

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS MEDIANTE SU ADICIÓN A HORMIGONES, MORTEROS DE CEMENTO Y YESOS PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES

MATERIALES RECICLADOS PARA UNA ARQUITECTURA QUE SANA EL MUNDO, LA CIUDAD Y LA PERSONA

POR MARÍA MARTÍNEZ MORÓN



TRABAJO DE FIN DE GRADO. GRUPO N
TUTORES: MARÍA JESÚS MORALES CONDE, MARÍA PRIETO PEINADO, IGNACIO CAPITÁN CARMONA
CURSO 2017/18. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE SEVILLA

Hacer útil aquello que el mundo no puede digerir...

ÍNDICE

0. RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. EL PLÁSTICO COMO PROBLEMA. MEDIOAMBIENTE, SALUD Y PERSONA.....	5
1.2. EL RESIDUO PLÁSTICO, ¿UN PROBLEMA? BÚSQUEDA DE SOLUCIONES. LA VERSATILIDAD DEL MATERIAL	9
2. OBJETIVOS Y ALCANCES DEL TRABAJO	11
2.1. OBJETIVOS	11
2.2. ALCANCES Y LÍMITES.....	12
3. METODOLOGÍA	13
4. RESIDUOS PLÁSTICOS EN HORMIGONES.....	19
4.1. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS EMPLEADOS. TIPOS, PROPIEDADES Y MÉTODOLOGÍAS DE PREPARACIÓN PREVIA	19
4.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES	22
5. RESIDUOS PLÁSTICOS EN MORTEROS DE CEMENTO	31
5.1. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS EMPLEADOS. TIPOS, PROPIEDADES Y MÉTODOLOGÍAS DE PREPARACIÓN PREVIA	31
5.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES	34
6. RESIDUOS PLÁSTICOS EN YESOS	42
6.1. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS EMPLEADOS. TIPOS, PROPIEDADES Y MÉTODOLOGÍAS DE PREPARACIÓN PREVIA	42
6.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES	45
7. NUEVOS MATERIALES. APLICACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	51
7.1. HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS.....	51
7.2. MORTERO DE CEMENTO CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS	52
7.3. YESO CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS.....	53
8. CONCLUSIONES	54
9. REFERENCIAS	56

0. RESUMEN

El plástico se ha convertido en un gran aliado de nuestra cotidianeidad. Su alta resistencia y durabilidad, su capacidad aislante, unido a su baja densidad y coste, lo corroboran.

Sin embargo, la vida útil que normalmente se le asigna es relativamente corta en relación con el tiempo que tarda en desaparecer.

He aquí el gran problema del plástico.

Actualmente, la litosfera e hidrosfera del planeta están siendo conquistadas por una nueva capa conformada por grandes montañas de residuos, en las que el plástico toma el papel protagonista. Esta presencia “sintética”, fruto de la actividad humana, supone un gran impacto sobre el medioambiente: actúa como gran contaminante atmosférico, altera numerosos ecosistemas (lo que deriva a su vez en graves consecuencias en la propia cadena alimenticia), e incluso interviene de forma activa en enfermedades que afectan a la salud de las personas.

Frente a tales hechos, organismos estatales e internacionales centran sus objetivos en promover en la sociedad estrategias basadas en la reutilización de productos plásticos, con el fin de alargar su vida útil. De esta forma, paulatinamente, el reciclaje del plástico se está consolidando como tema de gran actualidad en nuestras ciudades.

Si se extrapola la reutilización y el reciclaje de los plásticos al mundo de la Arquitectura, se presenta un interesante campo de trabajo que ofrece amplias posibilidades.

Una de ellas y el objeto de estudio del presente trabajo es el desarrollo de nuevos materiales basados en la adición de residuos plásticos a materiales constructivos tradicionales como hormigones, morteros de cemento y yesos. Esta mezcla entre materiales que hablan de lo masivo y rígido con otros que definen un lenguaje arquitectónico basado en la ligereza, así como en la redefinición y reciclaje de la propia materialidad, tiene como objetivo el diálogo entre las ventajas y beneficios que ambos ofrecen a la Arquitectura y a la Construcción.

Con ello, se estaría asumiendo la gran durabilidad y resto de propiedades de los productos plásticos para mejorar las características de otros ya existentes, resultando materiales que, no sólo superan en prestaciones a los que podemos encontrar actualmente, sino que también apuestan por la construcción de una arquitectura más sostenible con su entorno y más sana con las personas que la habitan.

He aquí el gran problema del plástico, hecho solución.

Palabras clave: plástico, residuo plástico, reciclaje, reutilización, nuevos materiales, hormigón, mortero de cemento, yeso

ABSTRACT

Plastics have become a great ally at present. Its high resistance and durability, its good insulating properties, with its low density and cost support it.

However, these products are assigned a short useful life in relation to the time they last long.

That is the big problem of plastics.

Currently, the lithosphere and hydrosphere of Earth are being conquered by a new layer, which is made up of big waste mountains and the plastics are the main character in them. This "synthetic" presence is the result of the human activity and involves an important impact on the environment: it acts as a big pollutant, changes numerous ecosystems (what has serious influences in food chain), and also takes action in many human diseases.

Against these facts, statewide and international agencies are focused on promoting strategies based on plastic wastes recycling in society, in order to extend plastics' useful life. In this way, plastic recycling is becoming a current topic in our cities.

If plastics recycling and reuse is extrapolated to the world of Architecture, an interesting field of work is presented, which offers a huge quantity of possibilities.

One of the subjects of study of the present work is the development of new materials based on the addition of plastic wastes to traditional materials, like concretes, cement mortars and gypsums. This mixture between massive and rigid materials and other materials which are related to the lightness and recycling is focused on showing the advantages and disadvantages that both types of materials offer to Architecture and Construction.

With all of those tasks, the great durability and all of plastics' properties would be assuming to improve existing materials, as well as to configure a new world that is more respectful with its environment and living beings inhabit it.

That is the big problem of plastics, become a solution.

Keywords: plastic, plastic waste, recycling, reuse, new materials, concrete, cement mortar, gypsum

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL PLÁSTICO COMO PROBLEMA. MEDIOAMBIENTE, SALUD Y PERSONA

Para referirse al término “plástico” el Diccionario de la Real Academia Española introduce la acepción de “Dicho de ciertos materiales sintéticos: Que puedan moldearse fácilmente y están compuestos principalmente por polímeros”. Como se observa, la propia semántica de este vocablo habla de una de las principales características que hacen que el uso de este material esté masivamente extendido en nuestra actualidad: su alta maleabilidad para concebir elementos de diversos tamaños, formas y geometrías.

A esa gran capacidad para ser fácilmente moldeado se le unen la baja densidad que presentan la mayoría de los plásticos, lo que les dota a su vez de gran ligereza. Además, los plásticos son muy resistentes a la corrosión provocada por muchas sustancias, hecho que les convierte en un material de gran durabilidad. Todo ello, unido a su amplia disponibilidad y su bajo coste han propiciado que el plástico sea un gran aliado de nuestra contemporaneidad.

Actualmente, el plástico de una manera o de otra nos acompaña en casi todas las actividades que desarrollamos en nuestro día a día. De hecho, el plástico se presenta como recurso principal en la producción de envases de alimentos, cosméticos, productos de higiene,... así como en otros ámbitos de consumo, tales como la construcción, la automoción, la electrónica, la moda, el deporte, la agricultura, la medicina, etc.

Este hecho ha suscitado la producción de forma masiva de millones y millones de toneladas de plástico. Según un informe realizado en Julio de 2015 por Ecologistas en Acción “la producción masiva de plásticos se inició en la década de 1950 y ha aumentado exponencialmente en 1,5 millones de toneladas al año (AEMA, web)” hasta cantidades de 335 millones de toneladas en 2016, según apunta el informe emitido por PlasticsEurope (2017), de las cuales 60 millones son producidas en Europa.



Fig. 1.DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA DE CONVERSIÓN DE PLÁSTICOS EUROPEOS (EU28+NO/CH) POR SECTOR EN 2016. Fuente: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) y Conversio Market & Strategy GmbH (PlasticsEurope, 2017)

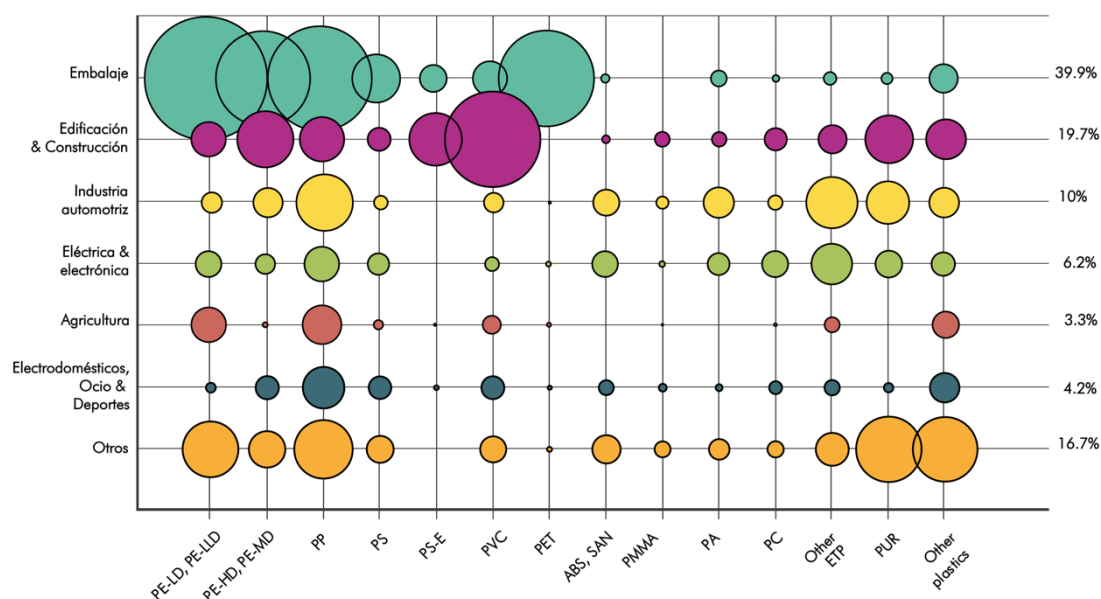


Fig. 2. DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA DE CONVERSIÓN DE PLÁSTICOS EUROPEOS (EU28+NO/CH) POR SECTOR Y POR TIPO DE POLÍMEROS EN 2016. Fuente: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) y Conversio Market & Strategy GmbH (PlasticsEurope, 2017)

El gran problema del plástico arranca en su corta vida útil. La sociedad actual marcada por el consumismo es también caracterizada por el “usar y tirar”: gran parte del plástico producido no se recicla, sino que se desecha, dando lugar a una litosfera e hidrosfera conquistada por grandes masas de basuras entre las que los residuos generados del uso y consumo de plástico son los más abundantes. Concretamente, según PlasticsEurope (2017) un 27,3 % del residuo plástico acaba en el vertedero y un 41,6% es incinerado, frente al 31,1% que es reciclado.

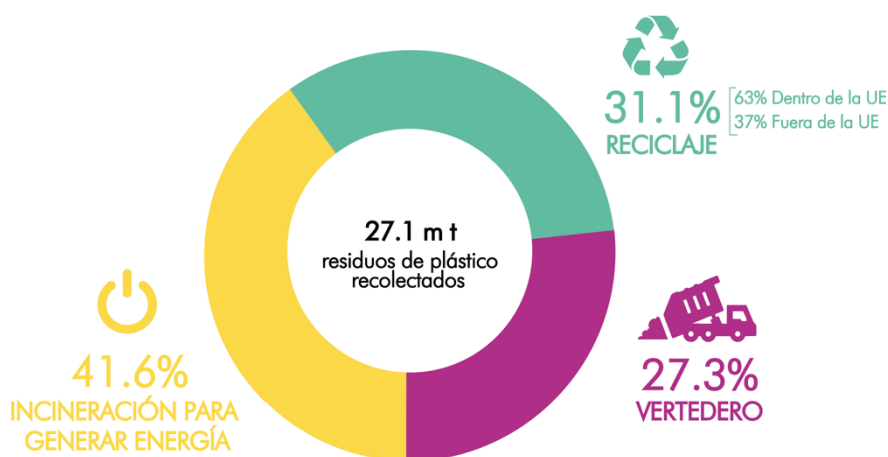


Fig. 3. TRATAMIENTO TRAS SU CONSUMO DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS EN 2016 (PlasticsEurope, 2017)

Esta situación no sólo está cambiando algunos paisajes de nuestro planeta, sino que también está contaminando nuestros mares y costas de pequeñas partículas no biodegradables y tóxicas, conocidas como microplásticos y nanoplásticos y de productos plásticos perfectamente visibles que manchan actualmente nuestras playas.



Fig. 4 a 6. Izquierda: Playa contaminada por residuos plásticos. Autor/a: Maleen/Marine Photobank. Centro: Neumáticos conquistando los fondos marinos. Autor/a: Steve Spring/Marine Photobank. Derecha: Nuevos ecosistemas repletos de basura. Autor/a: Claire Fackler, NOAA National Marine Sanctuaries/ Marine Photobank (Ecologistas en Acción, 2017)

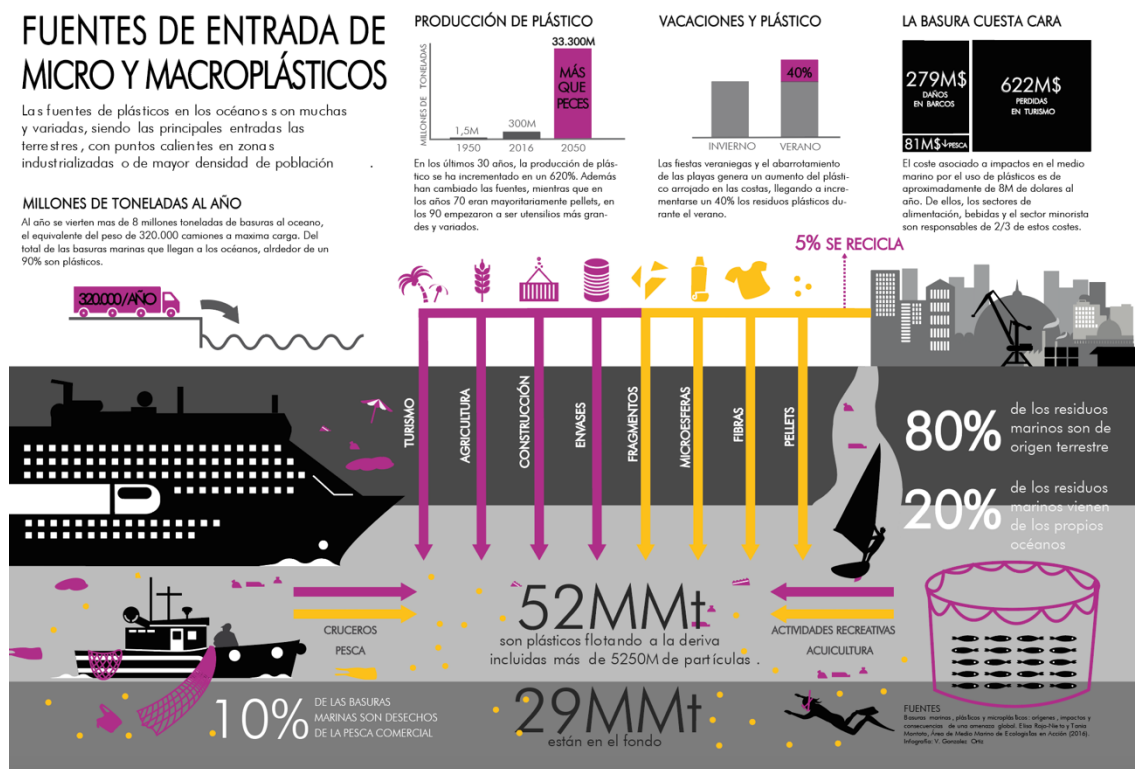


Fig. 7. ORIGENES, PRODUCCIÓN MUNDIAL, CANTIDADES VERTIDAS AL AÑO, COSTES DESTINO DE ESTA BASURA. Autor/a: Vanessa González Ortiz (Ecologistas en Acción, 2017)

En el mar estos microplásticos y nanoplásticos son ingeridos por los seres microscópicos que integran el plancton marino, así como por aves y otros animales, alterando con ello numerosos ecosistemas, y entrando a formar parte y contaminando la cadena alimentaria de la que todos dependemos. De esta forma, cada vez más están presentes en los organismos de animales y personas partículas tóxicas y cancerígenas que están atentando de manera directa contra la salud de todos los seres vivos del planeta. A continuación, se adjuntan las tablas extraídas del informe realizado por Ecologistas en Acción (2015), en las que se exponen una de las consecuencias de la presencia del plástico en nuestra actualidad, como es el uso del mismo para envases destinados a uso alimenticio.

Acrónimo	Código	Sustancia tóxica
PET (PETE)	1	Antimonio Formaldehído Acetaldehído Ftalato Bisfenol A Compuestos Trihalometanos
HDPE o PEAD	2	Antimonio Bromo Nonilfenol
PVC	3	Nonilfenol
LDPE o PEBD	4	Ftalato Aldehídos Cetonas Ácidos carboxílicos
PP	5	Ftalato Aldehídos Cetonas Ácidos carboxílicos Fenol Sustancias tóxicas estimulantes de la esclerosis
PS	6	Antimonio Bromo Estireno Etilbenceno Tolueno Benceno
PC	7	Antimonio Bromo Bisfenol A

Izquierda: Tabla 1. Algunas sustancias tóxicas lixiviadas a alimentos desde diferentes envases plásticos.

Abajo: Tabla 2. Autorización de la Comisión Europea en el uso de algunas sustancias tóxicas para la elaboración de plástico alimenticio y algunos de sus efectos en la salud humana. (Ecologistas en Acción, 2015)

Sustancia	Autorización para elaborar material plástico (Reglamento n° 10/2011)	Efecto en la salud humana
Antimonio	Su uso está permitido siempre y cuando no sobrepase una lixiviación de 0,04 mg Sb / Kg alimento envasado	Efectos sobre los pulmones, tracto respiratorio y piel (dermatitis), además produce graves alteraciones en la reproducción en humanos cuando existe una exposición prolongada o repetida de esta sustancia con código ICSC 07575 (Fichas Internacionales de Seguridad Química, web).
Formaldehído	Su uso sí está permitido y no presenta restricciones.	Posiblemente carcinógeno para los seres humanos cuando existe una exposición prolongada o repetida de esta sustancia con código ICSC 0275 (Fichas Internacionales de Seguridad Química, web).
Bisfenol A	Su uso no está regulado.	Puede producir sensibilización de la piel y fotosensibilización y afectar al tracto respiratorio superior cuando existe una exposición prolongada o repetida de esta sustancia con código ICSC 0634. La ingestión puede provocar efectos en el hígado y los riñones. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana (Fichas Internacionales de Seguridad Química, web).
Bromo	Su uso está permitido en forma de Bromuro de hexadeciltrimetilamonio para la fabricación de polímeros pero no como aditivo o monómero.	Puede afectar al tracto respiratorio y al pulmón dando lugar a inflamaciones crónicas y alteraciones funcionales cuando existe una exposición prolongada o repetida de esta sustancia con código ICSC 0107 (Fichas Internacionales de Seguridad Química, web).
Nonilfenol	Su uso no está regulado	Según el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (web): si la exposición es de corta duración es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio, mientras que su inhalación puede originar edema pulmonar. También altera los mecanismos endocrinos. Su bioacumulación es significativa en organismos acuáticos y en pájaros.
Ftalatos	Su uso no está regulado	Tienen un efecto similar al Bisfenol A (Singh y Li, 2012).

1.2. EL RESIDUO PLÁSTICO, ¿UN PROBLEMA? BÚSQUEDA DE SOLUCIONES. LA VERSATILIDAD DEL MATERIAL

Frente a esta problemática, organismos internacionales, nacionales, regionales y municipales plantean estrategias destinadas a promover en la sociedad una toma de conciencia de la crítica situación a la que se enfrentan nuestras ciudades, con el fin de generar un cambio de actitud que hiciera como bandera el reciclaje y la reutilización de los residuos para ayudar a sanar el planeta.

Según el informe llevado a cabo por Ecologistas en Acción (2017), la Comisión Europea aprobó en Diciembre de 2015 ciertas medidas y propuestas al respecto. Entre ellas, cabe citar las siguientes:

- Desarrollar una estrategia para 2017 en cuanto a los plásticos y el diseño ecológico de los mismos, con tendencia a promover la reparabilidad, durabilidad y reciclabilidad de los productos, además de la eficiencia energética.
- Alcanzar un 55% de reciclaje/reutilización de plásticos procedentes de embalaje para 2050.
- Incluir la prevención y medidas de mitigación en los planes de gestión de residuos.
- Establecer una conexión entre las tasas pagadas por los productores y los costes reales de gestión y reciclado de los productos de manera que se incentive económicamente el uso de materiales reciclados cuando sea posible.
- Reducir la basura marina en un 30% para el 2020 en cuanto a los tipos de basura más comunes encontrados en las playas, así como para los aparejos de pesca en los océanos.
- Poner en marcha incentivos económicos para que los productores pongan en el mercado productos más ecológicos.
- Apoyar regímenes de recuperación y reciclado (por ejemplo, envases, baterías, aparatos eléctricos y electrónicos, y vehículos).

Además, en la actual directiva europea, la Directiva 2006/12/CE (2006), se recoge la necesidad de elaborar unos Planes de Residuos adecuados, tanto a nivel nacional como autonómico y municipal. Poco a poco, los países van asumiendo estas iniciativas y se adentran en el reto de reutilizar el plástico. PlasticsEurope (2017) expone un gráfico en el que se observa la actividad de los distintos países de la Unión Europea en 2016 relativa al tratamiento de residuos plásticos (Fig.8). De dicho gráfico podemos extraer como conclusión el hecho de que los países con restricciones de residuos reciclables y recuperables presentan unas mayores tasas de reciclaje de residuos, entre los cuales destacan Suiza, Austria, Alemania, Holanda, Suecia y Dinamarca.

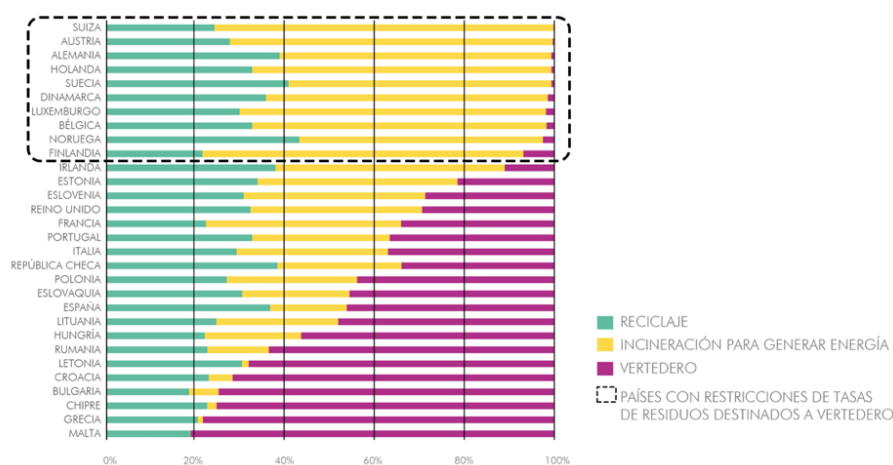


Fig. 8. TASAS DE RESIDUOS RECICLADOS, DESTINADOS A GENERACIÓN DE ENERGÍA Y A VERTEDERO POR PAÍSES Conversio Market & Strategy GmbH (PlasticsEurope, 2017)

Por su parte, en España se desarrolló un Plan Nacional integrado de residuos (2009), en el que se exponen ciertas mejoras: *"Ha aumentado en todas las administraciones, los sectores económicos y sociales y en la población en su conjunto, la conciencia ambiental en materia de residuos. No es exagerado afirmar esto, es un hecho constatable, si se compara la conciencia social en esta materia existente hoy día con la de hace unos años. No quiere esto decir que todos cumplan debidamente con lo exigido, pero ese cambio psicológico es una condición necesaria para progresar en la mejora de la situación actual"* (Consejo de los Consumidores y Usuarios de Andalucía, 2008).

Es necesario destacar que el motivo principal que, de alguna manera, promueve y gesta todas estas iniciativas es el hecho de que los residuos plásticos son muy resistentes y, por tanto, presentan una alta durabilidad, razón por la cual, es posible (y necesario) alargar su vida útil.

Si nos centramos en el campo de la Arquitectura y la Construcción, podemos decir que la alta durabilidad y resistencia a la corrosión, así como su gran capacidad de aislamiento, resistencia al fuego y la rentabilidad que ofrece, han propiciado que el plástico se convierta en uno de los materiales más solicitados en las edificaciones actuales.

En cierta medida, en este caso, el plástico está siendo empleado para construir edificios cuya vida útil es más longeva que la que ordinariamente se le da al plástico.

De ahí que consideremos que desde la Arquitectura existe un amplio campo de posibilidades para reducir las tasas de residuos plásticos en nuestro planeta. Sus aplicaciones actuales son diversas: como material de revestimiento, como material aislante e impermeabilizante, en redes de abastecimiento y saneamiento, etc.

Si además del uso del plástico como material puro en construcción, se emplea con otros materiales que marcan el lenguaje con el que se escribe la Arquitectura de nuestros días (tales como el hormigón, el mortero de cemento y el yeso), estaremos generando nuevos materiales que, no sólo definirán una Arquitectura del futuro que apuesta por la mezcla de las ventajas de los materiales del pasado y del presente, sino que además se estará concibiendo un nuevo modo de hacer arquitectura, que pretende sanar y salvar el mundo sobre el que interviene.

En esas anteriores palabras podría ser resumido el objetivo del trabajo ante el cual nos encontramos: confirmar que es posible, desde el ámbito de la Arquitectura y la Construcción, hacer del problema del plástico una solución de mejora para los materiales con los que se construye actualmente, a partir del reciclaje y la reutilización de los residuos generados del consumo de dicho material.

No obstante, aprovechar los beneficios que presenta el residuo plástico para incorporarlos a materiales tradicionales como hormigones, morteros de cemento y yesos es un tema que numerosos investigadores ya han estudiado, como se recoge en el apartado 2.2 Alcances y límites, en el que se muestran 16 investigaciones centradas en hormigones, 14 en morteros de cemento y 9 en yesos. Por ello, nuestro objetivo será superponer en un sólo documento, como el presente, los resultados que ellos han obtenido.

Cabe señalar que ya se han realizado revisiones bibliográficas previas por otros autores (Sharma y Bansal, 2016; Saikia y de Brito, 2012; Siddique et al., 2008; Gu y Ozbakkaloglu, 2016; Yin et al., 2015; Alfahdawi et al., 2016). No obstante, estas revisiones se centran fundamentalmente en hormigones. Sólo una de ellas (Saikia y de Brito, 2012) también estudiará el mortero de cemento como compuesto.

Sin embargo, no existe hasta la fecha un estudio en el que se relacionen los resultados obtenidos por investigaciones relativas a la incorporación de residuos plásticos a hormigones, morteros de cemento y yesos de manera conjunta.

Por tanto, el presente trabajo tomará esa oportunidad de aportar cierto atisbo de nuevo conocimiento, teniendo para ello como objetivo realizar una **revisión bibliográfica sobre el reciclaje de residuos plásticos mediante su adición a hormigones, morteros de cemento y yesos para el desarrollo de nuevos materiales**.

2. OBJETIVOS Y ALCANCES DEL TRABAJO

2.1. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objeto el estudio de las posibilidades de la reutilización y reciclaje de residuos plásticos en materiales constructivos tradicionales para el desarrollo de nuevos materiales, compuestos que amplíen la oferta de productos y ofrezcan una arquitectura más respetuosa con su entorno.

Concretamente, se apuesta por el estudio y análisis de las ventajas y beneficios que supone la adición de agregados procedentes de residuos plásticos a hormigones, morteros de cemento y yesos.

Todo ello, a su vez, deriva en la toma de consciencia de que actualmente el plástico tiene un gran impacto sobre nuestra realidad, pero que, a través de la explotación de sus propiedades y la redefinición de su vida útil, podemos hacer de éste un material que mejora nuestro medioambiente, nuestras ciudades e incluso nuestra calidad de vida.



De esta forma, los objetivos específicos del presente trabajo pueden ser pormenorizados del siguiente modo:

- **Exposición de la situación actual** de la problemática relacionada con el plástico y su residuo.
- **Estudio sobre las investigaciones** en las que se abordan temas relacionados con la adición de residuos plásticos a hormigones, morteros de cemento y yesos.
- **Análisis de los datos obtenidos** por las investigaciones estudiadas.
- **Relación y análisis de las distintas aplicaciones** que los nuevos compuestos obtenidos pueden tener en el mundo de la Arquitectura y la Construcción.
- **Construcción de unas conclusiones** que pongan en relación todo lo desarrollado en el trabajo.

2.2. ALCANCES Y LÍMITES

Este trabajo se centra en el análisis de residuos plásticos procedentes de Construcción y Demolición (RCD), así como de la industria automovilística y de gestión de residuos, entre otros, y su incorporación a hormigones, morteros de cemento y yesos. Se realiza un estudio pormenorizado de las investigaciones realizadas por diversos autores internacionales en relación a la gestión, reciclaje y reutilización de los mismos, desde el año 2006 hasta la actualidad.

Se enumeran a continuación todas las investigaciones analizadas. En concreto, se estudian 16 artículos centrados en hormigones, 14 en morteros de cemento y 9 en yesos. Cabe citar que el orden en el que se exponen los estudios no atiende a cuestiones cronológicas. Estos han sido organizados en función del compuesto analizado (hormigón, mortero de cemento o yeso), el tipo de residuo plástico incorporado, el año de publicación y sus autores.

ARTÍCULOS ANALIZADOS

ADICIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS A HORMIGONES

No.	ARTÍCULOS DE REFERENCIA
1	Lakshmi y Nagan (2011)
2	Manjunath (2015)
3	Bulut y Şahin (2017)
4	Albano et al. (2009)
5	Choi et al. (2009)
6	Saikia y De Brito (2014)
7	Islam et al. (2016)
8	Sayadi et al. (2016)
9	Ghernouti et al. (2015)
10	Yang et al. (2015)
11	Záleská et al. (2016)
12	Ruiz-Herrero et al. (2016)
13	Yildirim y Duygun (2017)
14	Kou et al. (2009)
15	Mounanga et al. (2008)
16	Lima et al. (2010)

ARTÍCULOS ANALIZADOS

ADICIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS A MORTEROS DE CEMENTO

No.	ARTÍCULOS DE REFERENCIA
17	Hannawi et al. (2010)
18	Ghernouti y Rabeih (2012)
19	Iucolano et al. (2013)
20	Da Silva et al. (2014)
21	Al-Tulaian et al. (2016)
22	Ferrándiz Mas et al. (2012)
23	Ferrándiz Mas et al. (2014)
24	Coppola et al. (2016)
25	Verdolotti et al. (2014)
26	Ruiz-Herrero et al. (2016)
27	Aattache et al. (2017)
28	Badache et al. (2018)
29	Wang y Meyer (2012)
30	Gadea et al. (2010)

ARTÍCULOS ANALIZADOS

ADICIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS A YESOS

No.	ARTÍCULOS DE REFERENCIA
31	Madariaga (2008)
32	San-Antonio-González et al. (2015)
33	Bicer y Kar (2017)
34	San-Antonio-González et al. (2015)
35	Del Río Merino et al. (2018)
36	Karaman et al. (2006)
37	Gutiérrez-González et al. (2012)
38	Parres et al. (2009)
39	Serna et al. (2012)

En los apartados siguientes se analizan y superponen los resultados obtenidos en los distintos trabajos, que se constituirán en una serie de propiedades físicas, mecánicas y relacionadas con la durabilidad, entre otras, de los diferentes compuestos. Además, el análisis de dichas propiedades se acompaña del estudio de aquellas aplicaciones constructivas desarrolladas por los distintos autores, en su caso. Ello constituye un motivo adicional con el que se verifican y justifican la posibilidad y versatilidad de los nuevos materiales propuestos para nuestra actualidad.

3. METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo del presente trabajo se basa en el estudio documental y el análisis bibliográfico existente sobre la problemática actual, derivada del incremento de residuos plásticos, y las propuestas de reutilización para el desarrollo de aplicaciones constructivas. Dicha metodología se materializa en las siguientes acciones o tareas: DESCRIPCIÓN, REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA, ANÁLISIS DE RESULTADOS, APLICACIÓN y REFLEXIÓN.

DESCRIPCIÓN					
			REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA		
				SUPERPOSICIÓN	
					APLICACIÓN
					REFLEXIÓN

TAREA 1: DESCRIPCIÓN

El capítulo 1. Introducción se centra en el desarrollo de esta tarea. Se parte de una información objetiva y extraída de la situación actual del plástico como problema, así como de las estrategias que actualmente se proponen como solución a su impacto. A partir de esta exposición de la realidad del plástico y del residuo plástico el trabajo presenta una de las propuestas de solución vinculadas al campo de la Arquitectura y la Construcción, como es el análisis de la adición de residuos plásticos a hormigones, morteros de cemento y yesos.

TAREA 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica constituye el cuerpo principal del trabajo. Se realiza una fase intensiva de búsqueda sobre las investigaciones realizadas en este campo de estudio. Cada una de las publicaciones que se consideran esenciales para el desarrollo del trabajo constituye un estrato de análisis fundamental en el mismo.

Así, se revisan y analizan un total de 39 artículos científicos extraídos de bases de datos indexadas (JCR, SJR, Riba, Avery a través de WOS y Scopus) y publicados a partir de 2006. De ellos, 16 se centran en el hormigón como compuesto 14 en el mortero de cemento y 9 en estudios relacionados con el yeso.

Se analizan una serie de investigaciones en las que se trabaja con la adición de los siguientes tipos de residuos plásticos: plástico procedentes de aparatos electrónicos (en adelante E-Plástico), Polietileno de Tereftalato (PET), Poliestireno expandido (EPS), Polipropileno (PP), Policloruro de vinilo (PVC), Poliuretano (PUR), Etileno y Acetato de vinilo (EVA), Polietileno (PE), Poliestireno de alto impacto (HIPS), Policarbonato (PC), Polietileno de alta densidad (HDPE), Poliamida, Poliestireno extruido (XPS), Caucho, Resina de tragacanto y Látex. Estos residuos será aplicados a los distintos compuestos (hormigones, morteros de cemento y yesos) en forma de fibra, espuma o como partículas de agregados finos o gruesos. Se observa que numerosos estudios se han centrado en la adición de residuos de PET, así como de EPS, PUR y PVC.

Es necesario destacar el hecho de que, a pesar de que este trabajo se centra en la revisión bibliográfica de investigaciones que trabajan con el reciclaje del residuo plástico, se ha considerado interesante incorporar algunos estudios relevantes en los que se trabaja con la adición de otros materiales junto con el residuo plástico. De esta forma, Islam et

al. (2016) estudian la incorporación de PET a hormigones junto con agregados gruesos de ladrillo.

También, cabe señalar que Lima et al. (2010) abordan el empleo de residuos de EVA como residuo de adición al hormigón y trabajan a su vez con residuos procedentes de la construcción y demolición (RCD).

Por su parte, Ferrándiz Mas et al. (2014) estudian la incorporación a morteros de cemento de EPS junto con ceniza de lodo de papel (PSA). Además, se realizan estudios que emplean como sustitución de los agregados tradicionales al yeso el EPS junto con resina de tragacanto (Bicer y Kat, 2017) y látex, aditivo de adhesión, plastificador, fibra de vidrio y fibra de PP, como aditivos (San-Antonio-González et al., 2015).

Los residuos estudiados proceden, en su mayoría, de empresas dedicadas al procesamiento de residuos, así como a la industria de la construcción y el automóvil. Dentro del campo de la construcción, se emplearán residuos procedentes de tubos protectores de cables eléctricos (Yildirim y Duygun, 2017; Ruiz-Herrero et al., 2016), tuberías (Kou et al., 2009; Badache et al. 2018), paneles aislantes (Mounanga et al., 2008; Del Río Merino et al., 2018; San-Antonio-González et al., 2015; Bicer y Kar, 2017) y otros (Záleská et al., 2016; Gutiérrez-González et al., 2012; San-Antonio-González et al., 2015). También, observamos que numerosas investigaciones toman el residuo plástico de botellas y bolsas de plástico (Choi et al., 2009; Islam et al., 2016; Ghernouti et al., 2015; Albano et al., 2009; Saikia y de Brito, 2014; Ghernouti y Rabehi, 2012; Da Silva et al., 2014; Karaman et al., 2006).

Por otro lado, se incorporan investigaciones en las que se trabaja con residuos plásticos procedentes de aparatos electrónicos (Bulut y Şahin, 2017; Wang y Meyer, 2012), así como de la industria textil (Lima et al., 2010; Parres et al., 2009) y de neumáticos (Parres et al., 2009; Serna et al., 2012).

A continuación en las Fig. 9, Tabla 3 y Fig. 10 se refieren todas las investigaciones analizadas para cada uno de los compuestos, tipo de residuo plástico, así como el origen de los mismos.

Tabla 3. TIPO DE COMPUESTO RESIDUO PLÁSTICO Y PROCEDENCIA. ANÁLISIS GLOBAL

No.	ARTÍCULO DE REFERENCIA	TIPO DE COMPUESTO	TIPO DE RESIDUO PLÁSTICO	ORIGEN DE RESIDUO PLÁSTICO
1	Lakshmi y Nagan (2011)	HORMIGÓN	E-PLÁSTICO	APARATOS ELECTRÓNICOS
2	Manjunath (2015)	HORMIGÓN	E-PLÁSTICO	APARATOS Y COMPONENTES ELECTRÓNICOS
3	Bulut y Şahin (2017)	HORMIGÓN	E-PLÁSTICO (Y RESINA DE POLIÉSTER)	APARATOS ELECTRÓNICOS
4	Albano et al. (2009)	HORMIGÓN	PET	BOTELLAS DE PLÁSTICO
5	Choi et al. (2009)	HORMIGÓN	PET	BOTELLAS DE PLÁSTICO
6	Saikia y De Brito (2014)	HORMIGÓN	PET	BOTELLAS DE PLÁSTICO
7	Islam et al. (2016)	HORMIGÓN	PET (Y AGREGADOS GRUESOS DE LADRILLO)	BOTELLAS DE PLÁSTICO
8	Sayadi et al. (2016)	HORMIGÓN ESPUMADO	EPS	---
9	Ghernouti et al. (2015)	HORMIGÓN	FIBRAS DE PLÁSTICO (Y FIBRAS DE PP)	BOLSAS DE PLÁSTICO
10	Yang et al. (2015)	HORMIGÓN	PP	RESIDUOS EMPRESA DE PROCESADO
11	Záleská et al. (2016)	HORMIGÓN	PP	TUBOS
12	Ruiz-Herrero et al. (2016)	HORMIGÓN	PE Y PVC	TUBOS PROTECTORES DE CABLES ELÉCTRICOS
13	Yildirim y Duygun (2017)	HORMIGÓN	---	TUBOS PROTECTORES DE CABLES ELÉCTRICOS
14	Kou et al. (2009)	HORMIGÓN	PVC	TUBERÍAS
15	Mounanga et al. (2008)	HORMIGÓN	ESPUMA DE PUR	PANELES AISLANTES
16	Lima et al. (2010)	HORMIGÓN	EVA Y RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	PLANTILLAS DE CALZADOS Y DEMOLICIÓN DE EDIFICIOS
17	Hannawi et al. (2010)	MORTERO	PET Y PC	RESIDUO INDUSTRIAL
18	Ghernouti y Rabeih (2012)	MORTERO	---	BOLSAS DE PLÁSTICO
19	Iucolano et al. (2013)	MORTERO	MEZCLA DE POLIOLEFINA CON PET	RESIDUOS EMPRESA DE PROCESADO
20	Da Silva et al. (2014)	MORTERO	ESCAMAS Y PARTÍCULAS DE PET	BOTELLAS DE PLÁSTICO
21	Al-Tulaian et al. (2016)	MORTERO	FIBRAS DE PET	---
22	Ferrándiz Mas et al. (2012)	MORTERO	EPS	RESIDUOS EMPRESA DE PROCESADO
23	Ferrándiz Mas et al. (2014)	MORTERO	EPS Y PSA	ASOCIACIÓN NACIONAL DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (ANAPE) Y FÁBRICA DE PAPEL DE PERIÓDICO
24	Coppola et al. (2016)	MORTERO	MEZCLA DE POLIOLEFINA CON PP Y PE	RESIDUOS EMPRESA DE PROCESADO
25	Verdolotti et al. (2014)	MORTERO	PE,PP Y PET	RESIDUOS EMPRESA DE PROCESADO
26	Ruiz-Herrero et al. (2016)	MORTERO	PE Y PVC	TUBOS PROTECTORES DE CABLES ELÉCTRICOS
27	Aattache et al. (2017)	MORTERO	POLÍMERO DE PE	---
28	Badache et al. (2018)	MORTERO	HDPE	TUBERÍAS
29	Wang y Meyer (2012)	MORTERO	HIPS	APARATOS ELECTRÓNICOS
30	Gadea et al. (2010)	MORTERO	ESPUMA DE PUR	INDUSTRIA DEL AUTOMÓVIL
31	Madariaga (2008)	YESO	EPS	ENVASES Y EMBALAJES
32	San-Antonio-González et al. (2015)	YESO	EPS (CON LÁTEX, ADITIVO DE ADHESIÓN, PLASTIFICADOR Y FIBRA DE VIDRIO Y DE PP COMO ADITIVOS)	MATERIALES AISLANTES PROCEDENTES DE CONSTRUCCIÓN
33	Bicer y Kar (2017)	YESO	EPS Y TRAGACANTO	AISLAMIENTO TÉRMICO EDIFICIOS Y TRONCO PLANTA ASTRAGALUS
34	San-Antonio-González et al. (2015)	YESO	XPS	AISLAMIENTO TÉRMICO EDIFICIOS LOCALES
35	Del Río Merino et al. (2018)	YESO	XPS	AISLAMIENTO TÉRMICO DE CUBIERTAS
36	Karaman et al. (2006)	YESO	PET	BOTELLAS
37	Gutiérrez-González et al. (2012)	YESO	ESPUMA DE PUR	INDUSTRIA DEL AUTOMÓVIL Y LA CONSTRUCCIÓN
38	Parres et al. (2009)	YESO	FIBRAS Y MICROFIBRAS DE POLIAMIDA	INDUSTRIA TEXTIL Y NEUMÁTICOS
39	Serna et al. (2012)	YESO	CAUCHO	NEUMÁTICOS

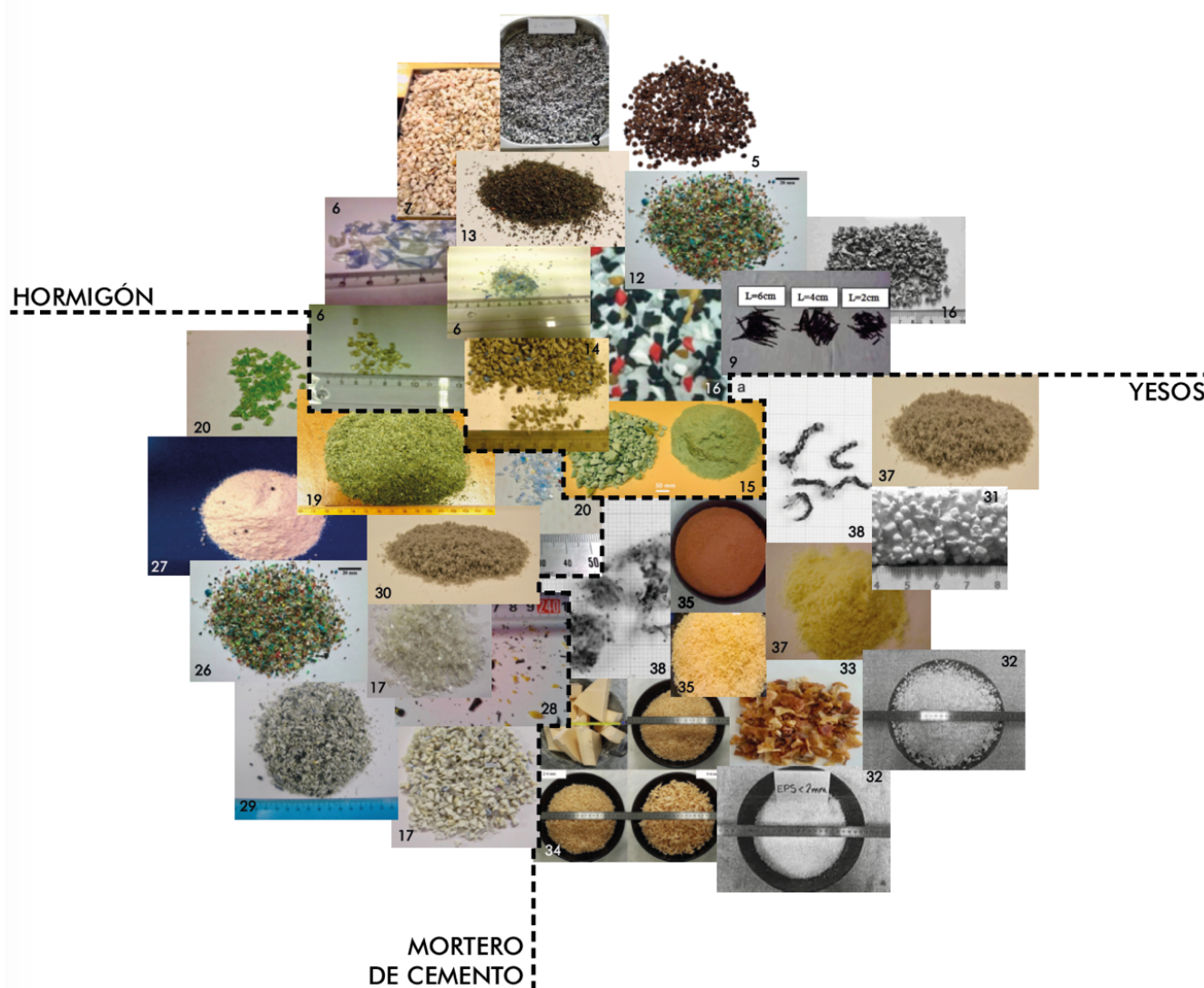


Fig. 9. COMPUESTOS Y TIPOS DE RESIDUOS. SUPERPOSICIÓN GRÁFICA

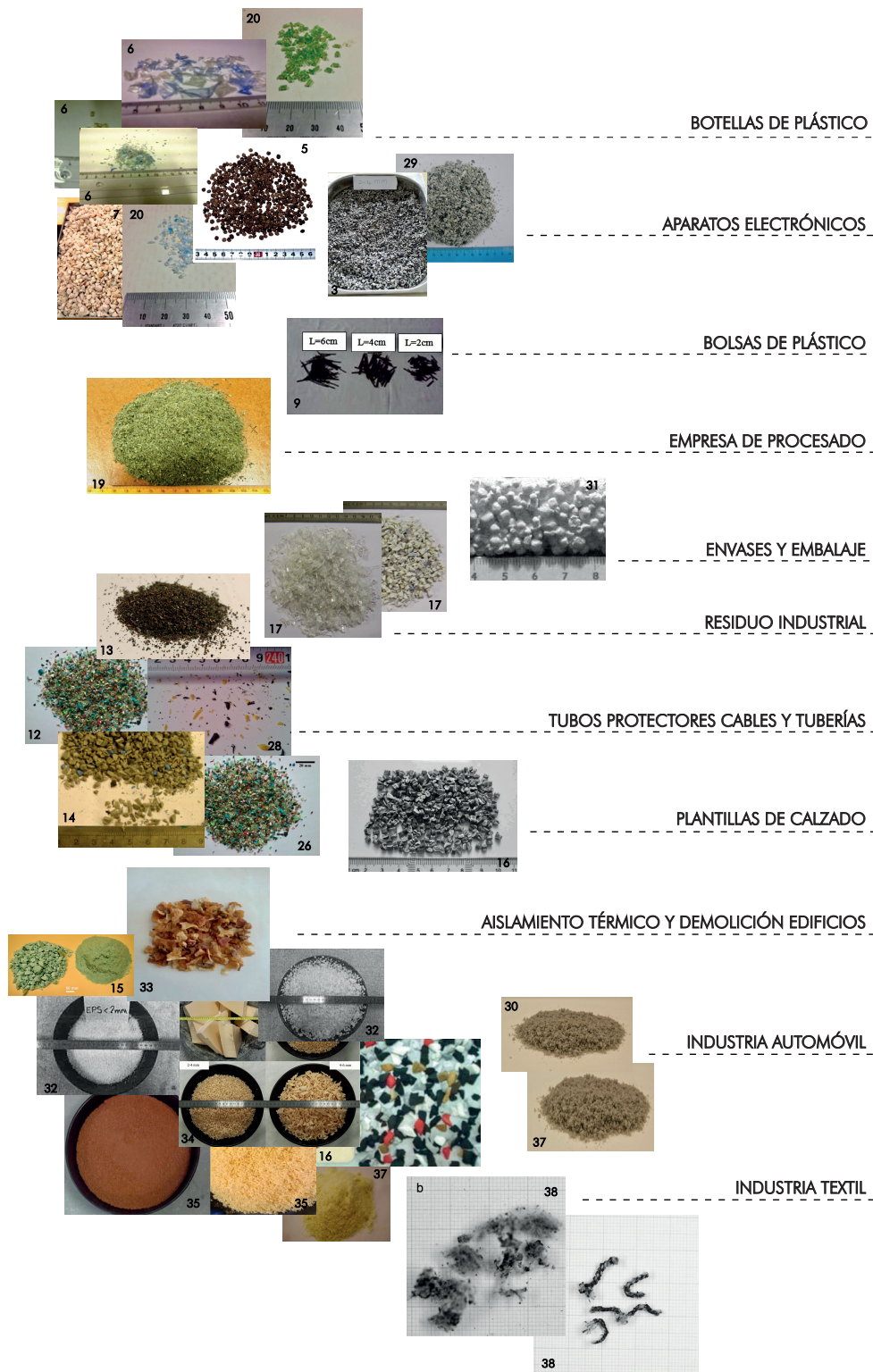


Fig. 10. ORIGEN Y TIPOS DE RESIDUOS. SUPERPOSICIÓN GRÁFICA

Una vez abordado el análisis global de los distintos tipos compuestos, agregados, así como la procedencia de los mismos, se precisa de un estudio exhaustivo y pormenorizado de los resultados que se obtienen de la creación de nuevos materiales a partir del reciclaje de residuos plásticos.

Los capítulos 4, 5 y 6 tienen ese objetivo. Cada uno de ellos se centra en el análisis de las propiedades de los nuevos materiales basados en la adición de residuos plásticos a hormigones, morteros de cemento y yesos, respectivamente.

TAREA 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS: PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS, RELACIONADAS CON LA DURABILIDAD Y OTRAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES

Esta fase de estudio se desarrolla en los capítulos 4, 5 y 6 del presente trabajo. Estos se centran en el análisis, fundamentalmente gráfico, de los resultados obtenidos por cada una de las investigaciones analizadas.

Además, parten de una exposición de las propiedades de los residuos plásticos estudiados y de los métodos aplicados para su obtención.

TAREA 4: ESTUDIO DE APLICACIONES CONSTRUCTIVAS

El análisis de dichas propiedades se apoya y complementa con la incorporación de una serie de aplicaciones constructivas, extraídas de los trabajos estudiados. Esta tarea se aborda en el capítulo 7 del presente trabajo y trata de reforzar las ventajas, así como la eficiencia y la versatilidad de los nuevos materiales desarrollados.

TAREA 5: REFLEXIÓN

Finalmente, con todo ello se construye una reflexión adecuada y justificada de todo lo analizado, que queda recogida en el capítulo 8. En él se exponen unas conclusiones que establecen un diálogo entre la situación actual del plástico y su residuo, la relación de resultados a los que se ha llegado y el futuro desarrollo que podría tener el presente trabajo.

4. RESIDUOS PLÁSTICOS EN HORMIGONES

El hormigón es un material de construcción clave en la conformación del lenguaje arquitectónico actual. Se produce mediante la combinación de un aglomerante (cemento y agua), áridos (grava y arena, de granulometrías controladas) y aditivos, en su caso. Su aplicación en el campo de la Arquitectura es diverso. Aunque su función más frecuente es estructural, acompañado de barras de acero para concebir hormigón armado, también es empleado en la conformación de revestimientos de paramentos y pavimentos (Ching, F., 2005).

No obstante, diversos estudios centran sus objetivos en conocer las ventajas y desventajas que supone la incorporación de otros materiales, como los residuos plásticos, en la definición de este compuesto. El análisis de los efectos que supone la incorporación de residuos plásticos a hormigones se lleva a cabo a partir de la revisión de los siguientes trabajos: Lakshmi y Nagan (2011), Manjunath (2015), Bulut y Şahin (2017), Albano et al. (2009), Choi et al. (2009), Saika y De Brito (2014), Islam et al. (2016), Sayadi et al. (2016), Ghernouti et al. (2015), Yang et al. (2015), Záleská et al. (2016), Ruiz-Herrero et al. (2016), Yildirim y Duygun (2017), Kou et al. (2009), Mounanga et al. (2008) y Lima et al. (2010).

De todos ellos se procede a realizar un análisis de las propiedades de los residuos plásticos estudiados, así como de su proceso de preparación y de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en cada caso.

4.1. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS EMPLEADOS. TIPOS, PROPIEDADES Y MÉTODOLOGÍAS DE PREPARACIÓN PREVIA

La Tabla 4 recoge los residuos analizados en cada estudio así como la caracterización de los mismos. Se analiza la incorporación a hormigones de agregados finos y gruesos de residuos plásticos procedentes de aparatos electrónicos o e-plástico, obteniendo de estos residuos unas gravedades específicas del orden de 1,01 y 1,1 kg/m³ y una absorción de agua menor al 0,2% (Lakshmi y Nagan, 2011; Manjunath, 2015. Bulut y Şahin (2017), además, apuestan por el análisis de este residuo junto con la incorporación de resina de poliéster insaturado con objeto de desarrollar una variante de hormigones poliméricos, y de incorporar las propiedades mecánicas que presenta la misma al nuevo material.

Por su parte, otros autores se centran en el estudio del desarrollo de nuevos materiales a partir de hormigón y agregados finos y gruesos de PET, con densidades aparentes entre 1340 y 1360 kg/m³, y densidades entre 351 y 1390 kg/m³ (Albano et al., 2009; Choi et al., 2009; Saika y De Brito, 2014; Islam et al., 2016). Islam et al. (2016), a su vez, estudian el efecto de la inserción de PET junto con el empleo de agregados gruesos de ladrillo como agregado natural.

También, la incorporación de PP es estudiada, tanto en forma de agregados finos y gruesos (Yang et al., 2015; Záleská et al., 2016) como de fibras, con objeto de estudiar la resistencia a la flexión y la durabilidad del nuevo hormigón (Ghernouti et al., 2015).

Además, Kou et al. (2009) analizan la sustitución de arena de río por agregados gruesos de policloruro de vinilo (PVC), de los que obtienen una resistencia a compresión inicial de 65 MPa, y Ruiz-Herrero et al. (2016) emplea este mismo junto con residuos de PE para el desarrollo de nuevos materiales.

Cabe citar que otros autores se han centrado en el estudio de las propiedades del hormigón con la integración de agregados finos de residuos de gomas procedentes de cables eléctricos, EPS, espuma de PUR (Yildirim y Duygun, 2017, Sayadi et al., 2016, Mounanga et al., 2008, respectivamente), así como de agregados finos y gruesos de EVA, procedentes de plantillas de zapatos, junto con residuos de la construcción y la demolición (Lima et al., 2010).

Los agregados finos analizados tienen un tamaño inferior a 2 mm, mientras que los agregados gruesos oscilan entre 2 y 63 mm. Las fibras, por su parte, presentan unas longitudes entre 2 y 12 mm y un diámetro comprendido entre 30 μm y 2 mm.

Para la preparación de los residuos se han llevado a cabo diversos procedimientos. Estos se muestran en la Fig. 11. Por un lado, algunos autores han recurrido a métodos de reciclado directo mediante triturado (Lakshmi y Nagan, 2011; Choi et al., 2009; Saika y De Brito, 2014; Islam et al., 2016; Sayadi et al., 2016; Yang et al., 2015; Záleská et al., 2016; Ruiz-Herrero et al., 2016; Kou et al., 2009; Mounanga et al., 2008; Lima et al., 2010) y corte (Choi et al., 2009; Ghernouti et al., 2015; Lima et al., 2010). De otro lado, autores como Choi et al. (2009), Saika y De Brito (2014) y Ghernouti et al. (2015) aplican tratamientos basados en la fusión.

Concretamente, Islam et al. (2016) obtienen la forma y el tamaño deseado de los agregados de PET mediante un previo lavado y triturado de las botellas, la fundición a una temperatura que oscila entre 280 y 320°, tras lo cual se le aplica de nuevo un triturado. Por su parte, las fibras de polipropileno y las procedentes de bolsas de plásticos se someten a un tratamiento de regeneración a una temperatura aproximada de 250°C, resultando de este proceso una pulpa fibrosa que se hace enfriar en un tanque de agua para endurecerla, pasando tras ello a una fase de cortado de fibra al tamaño deseado (Ghernouti et al., 2015).

En ambos ejemplos observamos que la preparación de los residuos define una estrategia basada en el reciclaje que precisa de un consumo de energía adicional no previsto que va en detrimento de la propia filosofía del reciclaje.

Tabla 4. PROPIEDADES DELOS RESIDUOS PLÁSTICOS INCORPORADOS EN EL HORMIGÓN, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

No.	ARTÍCULO DE REFERENCIA	TIPO DE COMPUESTO	TIPO DE RESIDUO PLÁSTICO	TIPOS Y CANTIDADES DE SUSTITUCIÓN	TAMAÑO DE PARTÍCULA/FORMA	DENSIDAD/DENSIDAD APARENTE (DA)/GRAVEDAD ESPECÍFICA (SG) (kg/m³)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	OTRAS PROPIEDADES
1	Lakshmi y Nagan (2011)	HORMIGÓN	E-PLÁSTICO	AGREGADOS GRUESOS 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24% PESO	ENTRE 1,18 mm Y 2,36 mm	SG: 1,01	< 0,2	---
2	Manjunath (2015)	HORMIGÓN	E-PLÁSTICO	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS: 0, 10, 20, 30% PESO	HASTA 20 mm	SG: 1,1 (20 mm)	0%	---
3	Bulut y Sahin (2017)	HORMIGÓN	E-PLÁSTICO (Y RESINA DE POLIÉSTER)	RESINA/COMPUESTO: 10-90%, 15-85%, 20-80% E-PLÁSTICO/LLENADO: AGREGADOS FINOS 0, 5, 15 Y 20% VOL.	0/2, 2/4, 4/8 mm	---	---	PESO ESPECÍFICO: 1,29 g/cm³
4	Albano et al. (2009)	HORMIGÓN	PET	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 0, 10, 20% VOL.	ENTRE 0,26 Y 1,14 cm	---	---	---
5	Choi et al. (2009)	HORMIGÓN	PET	AGREGADOS FINOS 0, 25, 50, 75% PESO	ENTRE 5 Y 15 mm	D: 1390	---	---
6	Saikia y De Brito (2014)	HORMIGÓN	PET	AGREGADOS FINOS (PF), GRUESOS (PC) Y ESFÉRICOS (PP) 5, 10, 15% VOL.	ENTRE 0,5 Y 11,2 mm	AGREGADOS FINOS (PF) DA: 1340; D: 555 AGREGADOS GRUESOS (PC) DA: 1340; D: 351 AGREGADOS ESFÉRICOS (PP) DA: 1360; D: 827	PF: 0,25 PC: 0,18 PP: 0,10	DENSIDAD SECA PF: 1320 kg/m³ PC: 1330 kg/m³ PP: 1360 kg/m³
7	Islam et al. (2016)	HORMIGÓN	PET (Y AGREGADOS GRUESOS DE LADRILLO)	AGREGADOS GRUESOS 0, 20, 30, 40 Y 50% VOL.	PET ENTRE 2 Y 11 mm LADRILLO ENTRE 2 Y 11 mm	SG: 1,58 SG: 2,33	0,43 9,75	MÓDULO DE FINURA: 6,70 MÓDULO DE FINURA: 6,86
8	Sayadi et al. (2016)	HORMIGÓN ESPUMADO	EPS	AGREGADOS GRUESOS 45, 67,4, 73,1, 822% VOL.	DIÁMETRO MEDIO: 6,5 mm	DA: 16,6 Y SG: 0,016	---	---
9	Ghemoulfi et al. (2015)	HORMIGÓN	FIBRAS DE PLÁSTICO (Y FIBRAS DE PP)	FIBRAS CONTENIDO 1, 3, 5 Y 7 kg/m³	FIBRAS DE POLIPROPILENO LONGITUD DE 12 mm, DIÁMETRO DE 30 µm FIBRAS DE BOLSA DE PLÁSTICO LONGITUD 2,4,6 mm, DIÁMETRO ENTRE 1,6 Y 2 mm	FIBRAS DE POLIPROPILENO D: 0,9 FIBRAS DE BOLSAS DE PLÁSTICO SG: 870	---	FIBRAS DE POLIPROPILENO MÓDULO DE ELASTICIDAD: 3 kN/mm²
10	Yang et al. (2015)	HORMIGÓN	PP	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS: 0, 10, 15, 20, 30% VOL.	ENTRE 1,5 Y 4 mm	DA: 950	---	---
11	Zdieski et al. (2016)	HORMIGÓN	PP	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 10, 20, 30, 40, 50% PESO	ENTRE 0,063 Y 63 mm	---	---	---
12	Ruiz-Herrero et al. (2016)	HORMIGÓN	PE Y PVC	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 2,5, 5, 10, 20% VOL.	ENTRE 0 Y 4 mm, 0 Y 8 mm, 8 Y 20 mm, 8 Y 32 mm	---	---	---
13	Yildirim y Duygun (2017)	HORMIGÓN	---	AGREGADOS FINOS 5, 10, 15% VOL.	ENTRE 0,25 Y 1,5 mm	---	---	---
14	Kou et al. (2009)	HORMIGÓN	PVC	AGREGADOS GRUESOS 0, 5, 15, 30, 45 % VOL.	MEÑORES DE 5 mm	DA: 546; D: 1400	---	RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 65 MPa
15	Mounanga et al. (2008)	HORMIGÓN	ESPUMA DE PUR	AGREGADOS FINOS 0, 13,1, 17, 173, 212, 218, 282, 337% VOL.	MEÑORES DE 2 mm	DA: 45±2	---	POROSIDAD: 98%
16	Lima et al. (2010)	HORMIGÓN	EVA Y RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLUCIÓN	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 0, 25, 50% VOL.	EVA: MEÑORES DE 9,5 mm Y CDW: MEÑORES DE 12,5 mm	EVA DA: 101; SG: 240 CDW DA: 1030; SG: 2520	EVA: 44,3% CDW: 12,1%	---

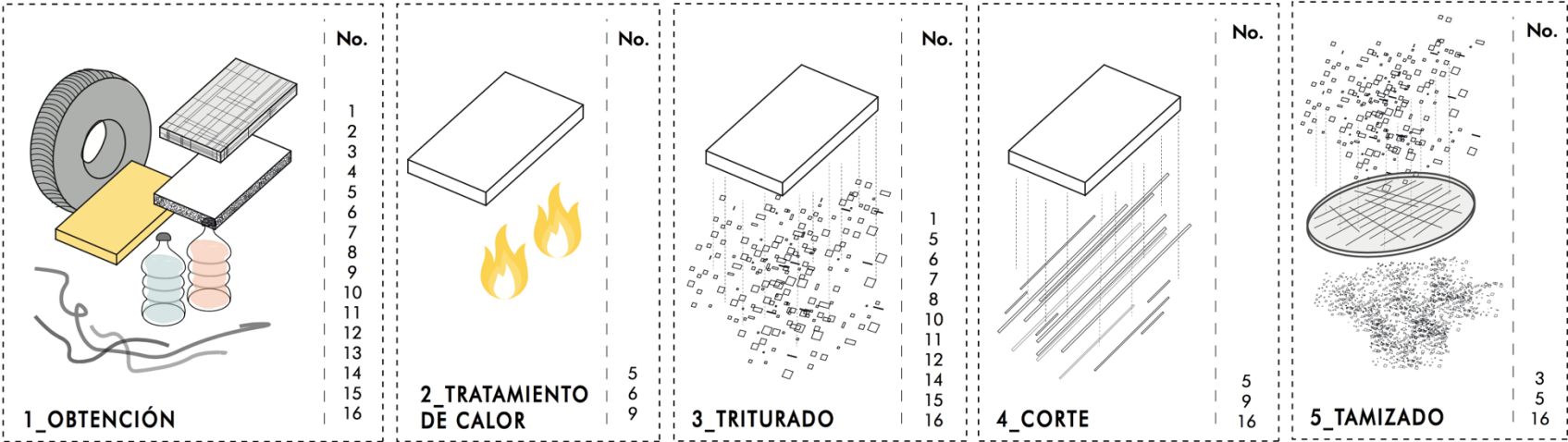


Fig. 11. MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS INCORPORADOS EN EL HORMIGÓN, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

4.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES

Las investigaciones analizadas trabajan la incorporación, mediante la adición o sustitución, de residuos plásticos a partir de la realización de una serie de ensayos. Estos quedan recogidos en la Fig. 5. El estudio de las propiedades físicas se centra fundamentalmente en el análisis del asiento y la densidad. Por su parte, se determinarán la resistencia a compresión, a flexión y a tracción, junto con el módulo de elasticidad y la resistencia a la abrasión, para la definición de las propiedades mecánicas. De las propiedades relacionadas con la durabilidad se estudiará principalmente la absorción de agua, además de la retracción, la permeabilidad al vapor de agua y la carbonatación. También se analizará la conductividad térmica de los agregados.

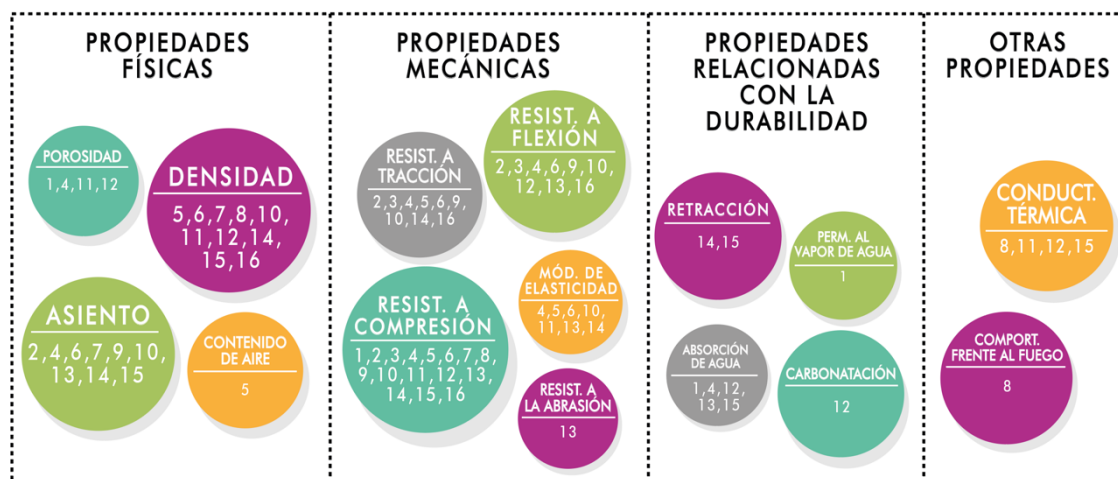


Fig. 12. ESTUDIOS SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS NUEVOS COMPUESTOS DE HORMIGÓN Y AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad

Una de las propiedades físicas fundamentales para clasificar entre materiales pesados y ligeros es la densidad. Algunos autores incorporan el estudio de esta propiedad en sus compuestos. En la mayoría de los casos se mide la densidad antes de proceder al moldeado de probetas. No obstante algunos se atienen a la norma UNE EN 12390-7 (2009), mientras que otros aplican las determinaciones de la norma ASTM C642 (ASTM, 2006) sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

La densidad obtenida de los distintos compuestos desarrollados se muestra en la Fig. 13. Se observa que la densidad de todas las muestras disminuye conforme incrementa el contenido de residuo plástico, debido a la menor densidad que presenta el residuo plástico frente al hormigón.

En líneas generales, la gráfica informa que para porcentajes de sustitución idénticos, los mayores valores de densidad se obtienen para las muestras con PET, PVC y EVA, estudiadas por Saika y De Brito (2014), Ruiz-Herrero et al. (2016) y Kou et al. (2009), respectivamente, seguidas de las muestras estudiadas con PP, espuma de PUR y EPS, para las que se obtienen valores muy reducidos de densidad (425 kg/m^3 para un 45% de contenido de EPS en vol. y 127 kg/m^3 para un 82,20% (Yang et al., 2015; Mounanga et al., 2008; Sayadi et al., 2016, respectivamente).

Cabe señalar que, Ruiz-Herrero et al. (2016) analizan la densidad de muestras de PVC y PE, así como de PVC y PE, de lo que concluyen que las muestras con PE presentan una menor densidad, debido a que la densidad del PE es menor a la del PVC, obteniéndose por consiguiente un valor intermedio cuando se mezclan ambos residuos.

Además, es necesario reseñar el hecho de que tanto Ruiz-Herrero et al. (2016) como Kou et al. (2009) estudian la densidad sobre muestras de PVC, obteniendo cada uno resultados que difieren considerablemente, concretamente en unos 500 kg/m^3 de diferencia. Este hecho puede deberse a la propia forma de trabajo de las muestras, aunque también podría estar relacionado con la aplicación de superplastificante en el caso de las muestras de Kou et al. (2009), aditivo del que carecen las primeras. No obstante, la reducción que presentan las probetas respecto a la muestra de referencia es similar: un 14,58% para las muestras de Ruiz-Herrero et al. (2016) y un 12% para las de Kou et al. (2009).

Por otro lado, a diferencia de la mayoría de los casos, los compuestos con espuma de PUR muestran una disminución de la densidad muy considerable, reduciéndose en un 52,96% para porcentajes de 28,20% de contenido de residuo, respecto a la muestra de referencia.

Por tanto, de todos estos resultados se concluyen las amplias posibilidades de los nuevos compuestos para el desarrollo de materiales aligerados y su aplicación como productos de revestimientos y acabados.

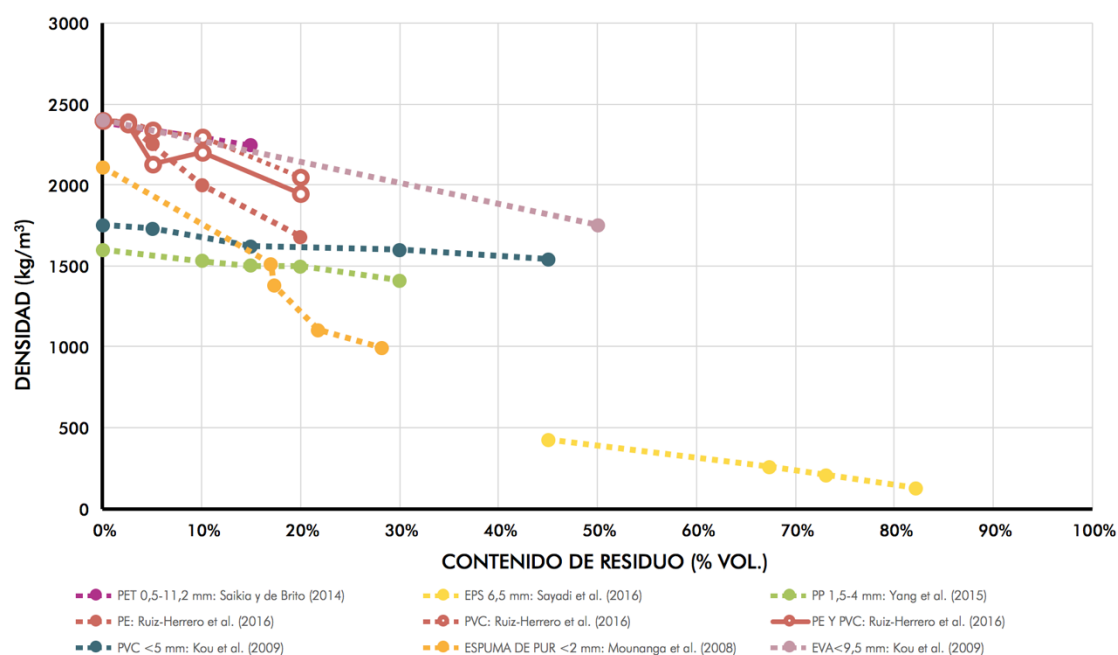


Fig. 13. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

Asiento

El asiento es una propiedad con la que se mide la viscosidad del hormigón en estado fresco. Para la obtención de ese nivel de viscosidad se recurre al “cono de Abrams”, un dispositivo cónico de 10 cm de diámetro y 30 cm de altura, en el que se introducen una serie de capas de hormigón y se compacta mediante una barra de acero. Tras ello, se elimina lentamente el cono, dejando que el hormigón fluya por su propio peso (Geymar, 1985).

Los resultados obtenidos de asiento en los distintos trabajos aparece reflejado en la Fig. 14. Se observa que no hay una tendencia general, sino que el efecto del asiento sobre cada muestra es diferente. Observamos que para las muestras de PET y PVC, no hay apenas diferencia respecto a la muestra de referencia, aunque sí se observa cierta disminución en algunos casos (Albano et al., 2009; Saika y De Brito, 2014; Kou et al., 2009).

Sin embargo, las muestras de hormigón estudiadas con agregados de PP por Yang et al. (2015) sufren un aumento en la trabajabilidad conforme incrementa el contenido de residuo plástico. Dicho aumento concretamente es del 31,25% para un 30% de PP respecto al de referencia (0% PP), y podría estar relacionado, según sus autores, con la reducida capacidad de absorción del residuo plástico y el consecuente incremento de agua libre en la muestra. No obstante, las muestra de hormigón autocompactante estudiadas con residuos PP satisfacen los requisitos dictaminado por la SF2 SCC y, por tanto, son adecuadas para aplicaciones normales (EFNARC, 2005).

Por su parte, en el caso de las muestras estudiadas con PET y agregados gruesos de ladrillo por Islam et al. (2016), el aumento del porcentaje de PET supone un incremento de la trabajabilidad, así como un incremento de la relación agua/cemento.

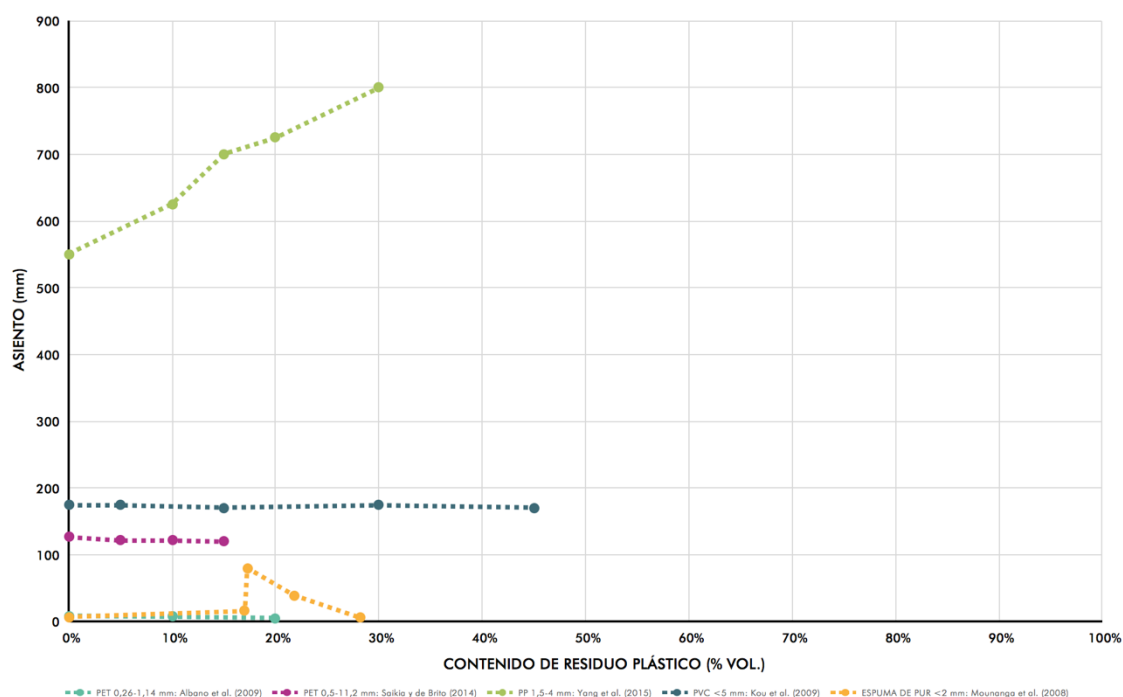


Fig. 14. VARIACIÓN DEL ASIENTO DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

PROPIEDADES MECÁNICAS

Resistencia a flexión

La resistencia a flexión es una propiedad relevante en la caracterización mecánica del hormigón. Algunos autores han analizado esta propiedad atendiendo a diferentes normas: ASTM 78 (2004), aplicada sobre losas de hormigón, UNE EN 12390-5 (2009), basado en el método de doblado de dos puntos, NBR 12142 (ABNT, 1991), aplicada sobre probetas prismáticas de 150 x 150 x 500 mm.

La Fig. 15 recoge los resultados obtenidos de la resistencia a flexión a los 28 días en cada trabajo. En líneas generales, se observa que la resistencia a flexión disminuye considerablemente conforme incrementa el contenido de residuo. Algunos autores concluyen que este hecho se debe a la débil unión interfacial entre el residuo plástico y la matriz de cemento (Manjunath, 2015; Ruiz-Herrero et al., 2016)

La gráfica informa que para porcentajes de contenido de residuo, los mayores valores de resistencia a flexión se obtienen para las muestras de EVA (Lima et al., 2010) y PET (Albano et al., 2009), seguidas de las muestras de EPS y PET (Yang et al., 2015 y Saikia y Brito, 2014), PET y PE con PVC, resultando los menores valores de esta propiedad para las probetas de PVC (Ruiz-Herrero et al., 2016).

Cabe citar que Lima et al., 2010 estudian los efectos de la resistencia a flexión en muestras con EVA y otros residuos de construcción y demolición (CDW), obtenidos en la demolición de un edificio. Se concluye que los valores de esta propiedad son mayores para las muestras con un 50% CDW que para las de EVA con el mismo porcentaje de agregados.

Por su parte, otros autores se han centrado en el análisis de la resistencia a flexión del hormigón con la incorporación de residuos procedentes de aparatos electrónicos o e-plástico. Manjunath (2015) de nuevo informa que la resistencia a flexión disminuye con el incremento de residuo plástico en la muestra. No obstante, Bulut y Şahin (2017) incorporan a las muestras de e-plástico resina de poliéster y concluyen que la resina aumenta considerablemente la capacidad de adhesión entre el residuo y la matriz cementosa y, por consiguiente, la resistencia a flexión.

El trabajo con fibras de residuos plásticos también arroja resultados más positivos. Ghernouti et al. (2015) obtienen que la incorporación de fibras de bolsas de plástico y PP, de 4 y 6 mm de longitud, suponen un incremento de la resistencia a flexión del 14% y 11%, respectivamente, respecto a la muestra de referencia (0% fibras). Ello se debe al fuerte vínculo que se produce entre la matriz cementosa y las fibras de plástico, gracias a la propia geometría de las mismas, que a su vez obstaculizan la aparición de microgrietas en el hormigón.

A pesar de ello, es necesario concluir que el desarrollo de nuevos materiales basados en la incorporación de agregados finos y gruesos limita su aplicación estructural. No obstante, las fibras de plásticos informan de la posibilidad de la creación de nuevos productos aligerados y con mayor resistencia a la flexión que los originales.

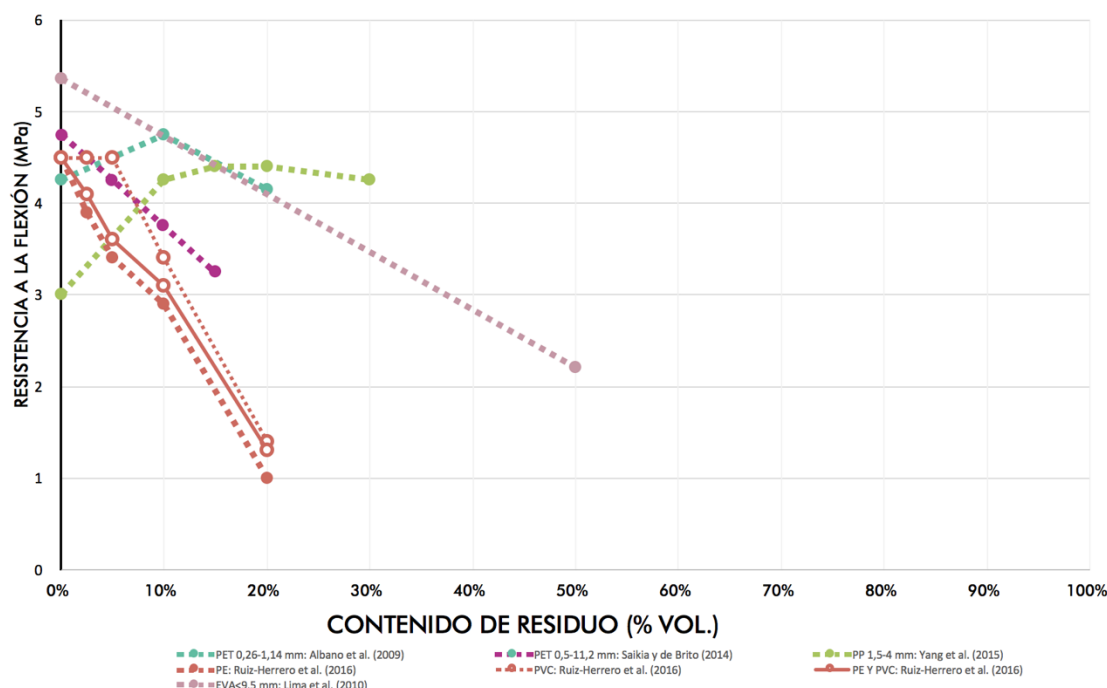


Fig. 15. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es una de las propiedades mecánicas más relevantes para caracterizar el hormigón en lo relativo a su capacidad estructural.

Los trabajos analizados estudian esta propiedad recurriendo a diversas normas: UNE 12390-3 (2003), ASTM C39 (2015), aplicada sobre cilindros de 200 mm y evaluada a los 28 días, y NBR 5739 (ABNT, 2007), aplicada sobre muestras de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

En la Fig. 16 aparecen grafados los resultados obtenidos en cada investigación. En esta figura se observa que, en líneas generales, la resistencia a compresión disminuye conforme aumenta el contenido de residuo plástico. El hormigón está formado por cristales de portlandita (silicatos de calcio hidratados) y etringita (trisulfoaluminato de calcio) en forma de fibras, que otorgan cohesión al hormigón. Algunos autores, tras la realización de micrografías sobre los nuevos materiales confirman que la incorporación de residuos plásticos supone una reducción del contenido de etringita, lo que implica una disminución de la cohesión del hormigón y, consecuentemente, de sus propiedades mecánicas. También, estas propiedades se ven afectadas por la mayor presencia de poros tras la evaporación de una mayor cantidad de agua libre que supone la presencia de residuo plástico en las muestras. (Albano et al., 2009).

No obstante, a pesar de que hay un descenso en la resistencia a compresión, las muestras al 10% de PET estudiadas por Albano et al. (2009), presentan un valor aceptable, puesto que los valores estándar para hormigones con resistencia moderada, según Porrero et al. (2004), oscilan entre 21 y 30 MPa a los 28 días.

Además, las muestras de EPS analizadas por Sayadi et al. (2016) muestran un ligero incremento de la resistencia para un porcentaje de contenido de residuo del 15%.

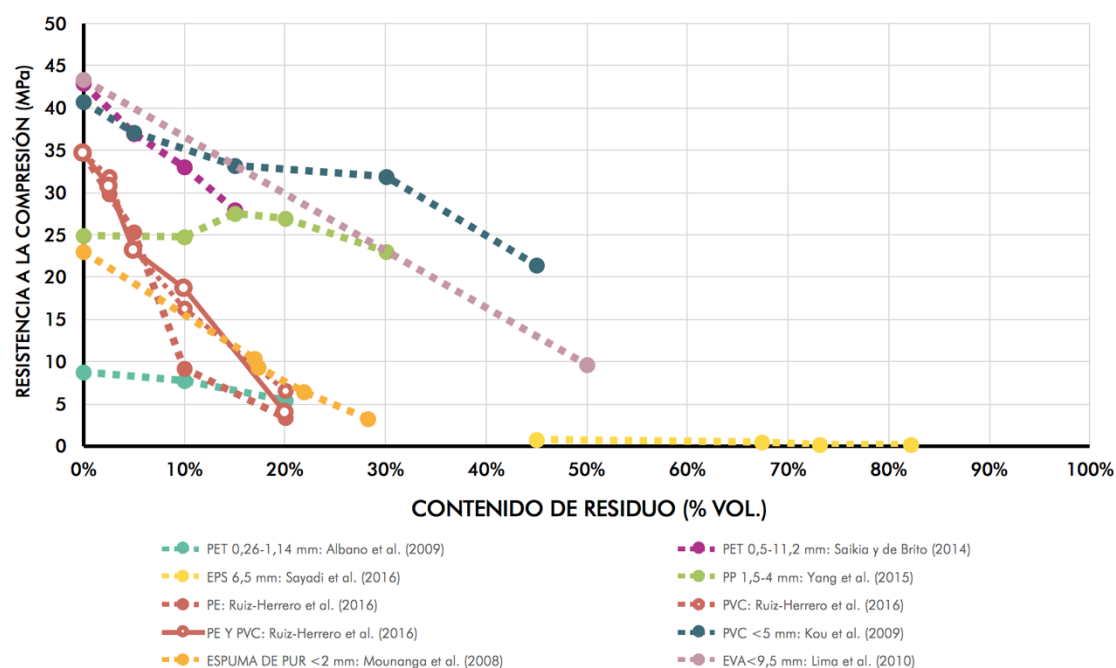


Fig. 16. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La gráfica informa que, para porcentajes de contenido de residuo idénticos se los valores mayores de resistencia a compresión se obtienen en las muestras de EVA y PVC, estudiadas por Lima et al. (2010) y Kou et al. (2009), respectivamente, seguidas por las muestras de PET y EPS (Saikia y Brito, 2014; Sayadi et al., 2016, respectivamente), las de PE y PVC de Ruiz-Herrero et al. (2016), y las de espuma de PUR de Mounanga et al. (2008), obteniéndose los menores valores en las muestras de PET, de Albano et al. (2009).

Por otro lado, es necesario recordar que las muestras de PVC estudiadas por Kou et al. (2009) presentaban una densidad menor a las de Ruiz-Herrero et al. (2016). En el análisis de esta propiedad observamos que las muestras de Kou et al. (2009), a pesar de su menor densidad muestran valores de resistencia a compresión que los segundos.

Cabe reseñar, a su vez, el hecho de que en la mayoría de los casos el descenso de la resistencia a la compresión de las muestras es considerable. Sin embargo, para las muestras de EPS de Sayadi et al. (2016) se produce un descenso más suave de esta propiedad, concretamente de un 8% para un 30% de EPS respecto a la muestra de referencia.

Todos estos estudios se han centrado en el análisis de residuos plásticos como agregados finos o gruesos. No obstante, las muestras estudiadas por Ghernouti et al. (2015) de hormigón con fibras de bolsas de plásticos y PP muestran un claro aumento de la resistencia a la compresión, efecto que ya otros autores también han confirmado (Song et al., 2005).

A pesar de ello, es necesario concluir, como es expuesto también por Ruiz-Herrero et al. (2016), que estos nuevos materiales a base de hormigón y residuos plásticos no son adecuados para su aplicación en elementos estructurales.

Resistencia a tracción

La resistencia a tracción es una propiedad con la que es posible la caracterización mecánica del hormigón. Algunos autores han estudiado el efecto de la incorporación de residuos plásticos sobre esta propiedad. Para su análisis han recurrido a diferentes normas: ASTM C496 (1996), medida sobre muestras cilíndricas de 110/200 mm colocadas horizontalmente sobre una máquina de compresión, UNE 12390-6 (2010) y NBR 7222 (ABNT, 1994), realizada sobre muestras cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

Los resultados de resistencia a tracción obtenidos en cada estudio se representan en la Fig. 17. Se advierte que, en líneas generales, un mayor contenido de residuo plástico en las muestras supone una disminución de la resistencia a tracción. La resistencia a tracción del hormigón es una propiedad que depende las características de la zona de transición interfacial (Mindess et al., 2003). La superficie

lisa de las partículas del residuo plástico, unido a la presencia de agua libre en las superficies del mismo implican una unión más débil entre estas partículas y la pasta cementosa (Saikia y Brito, 2014) y, por ello, una menor resistencia a tracción.

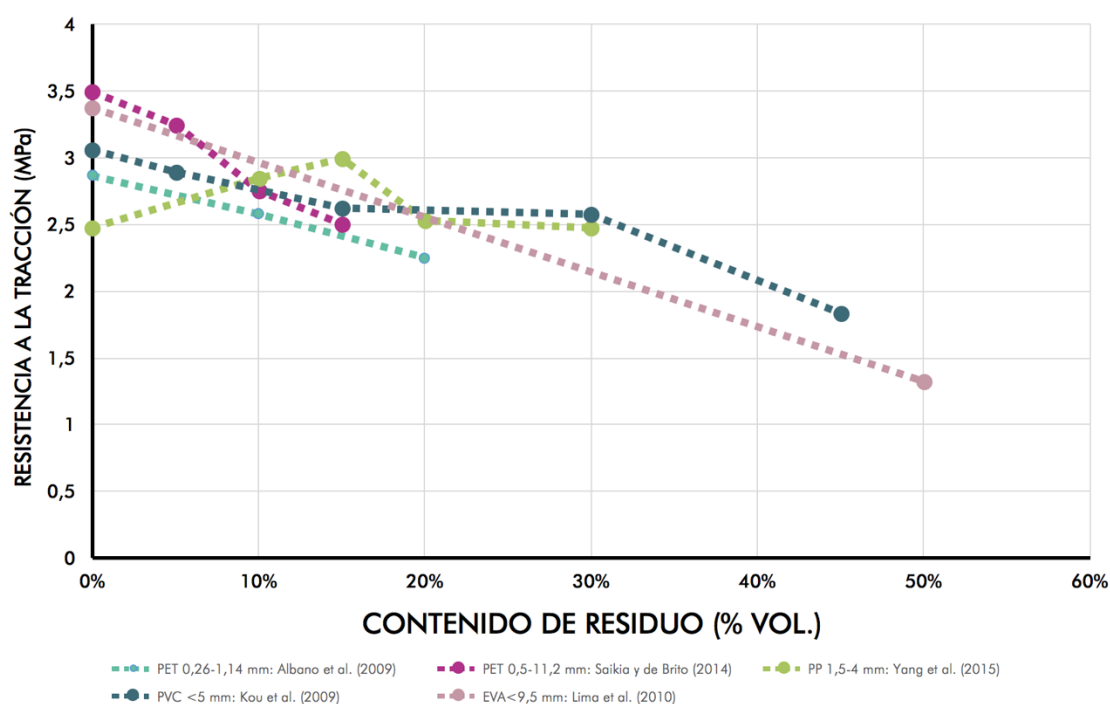


Fig. 17. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La gráfica informa que, para porcentajes de sustitución similares, se obtienen los mayores valores de resistencia a tracción en las muestras de PET estudiadas por Saikia y de Brito (2014) y Eva (Lima et al., 2010), seguidas de las muestras de PP, PVC y PET, de Yang et al. (2015), Kou et al. (2009) y Albano et al. (2009).

Por otro lado, pese a que la tendencia de la resistencia a tracción es disminuir conforme aumenta el contenido de residuo plástico, se observa un cierto aumento de la propiedad en las muestras de PP de Yang et al. (2015), llegando al máximo valor de 3 MPa para un 15% de sustitución de arena por PP. Ello se debe al efecto puente en la superficie fracturada de las partículas de columna corta. No obstante, a partir de este porcentaje, un aumento del contenido de residuo plástico implica una disminución de la resistencia.

Además, cabe señalar el hecho de que las muestras de PET estudiadas por Saikia y de Brito (2014) obtienen valores mayores de resistencia a tracción que los analizados por Albano et al. (2009). Sin embargo, la diferencia es mayor para porcentajes de contenido de plástico menores. El incremento de residuo en las muestras da lugar a resultados semejantes en ambos casos.

En cuanto a la incorporación de fibras de residuos plásticos, cabe reseñar que las muestras de hormigón con fibras de plástico y PP de Ghernouti et al. (2015) son más resistentes a la tracción cuanto mayor es el contenido de fibras. Según sus autores, este hecho se debe a la gran cantidad de fibras junto con la capacidad de las mismas para evitar la propagación de grietas en el hormigón.

De los resultados obtenidos, se confirma que estos nuevos materiales desarrollados no resultan adecuados para uso estructural, pero sí como parte de revestimiento de superficies. No obstante, los nuevos compuestos a base de fibras parecen tener otro futuro como material ligero y capacidades mecánicas y estructurales.

OTRAS PROPIEDADES

Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad destinada a definir la capacidad de transmisión de calor de un material y, por consiguiente, su capacidad aislante. Algunos autores han analizado esta propiedad sobre los nuevos compuestos desarrollados, recurriendo para ello a diferentes procedimientos, como la técnica de fuente de plano transitorio (Ruiz-Herrero et al., 2016).

En la Fig. 18 se representa la tendencia de la conductividad térmica observada en cada estudio. La gráfica informa que, generalmente, el aumento del contenido de residuo plástico deriva en un descenso considerable de la conductividad térmica y, por tanto, en un aumento de su capacidad aislante. Ello se debe a la gran porosidad que presentan los agregados plásticos, debido a la gran cantidad de poros que contienen aire en su interior, hecho que reduce significativamente la capacidad de conducción del calor (Mounanga et al., 2008).

Se observa que las muestras de PE, PVC y PE con PVC, estudiadas por Ruiz-Herrero et al. (2016), junto con las de espuma de PUR de Mounanga et al. (2008) obtienen resultados similares de conductividad térmica. No obstante, se observan unos valores muy reducidos de esta propiedad para las muestras de agregados de EPS analizadas por Sayadi et al. (2016). Según sus autores, este hecho se debe fundamentalmente al mayor contenido de EPS y, por tanto, a la menor densidad del agregado.

A partir de todos los datos obtenidos, se concluye que la incorporación de residuos plásticos al hormigón supone una disminución de la densidad, como se analiza en su apartado correspondiente y, a su vez, un aumento de la capacidad aislante. Tal hecho advierte los beneficios de estos nuevos materiales para su aplicación como productos de revestimiento gracias a los cuales se mejorarían las capacidades térmicas de los elementos constructivos sobre los que se aplicasen, contribuyendo a su vez con ello a la mejora de la calidad de los espacios interiores.

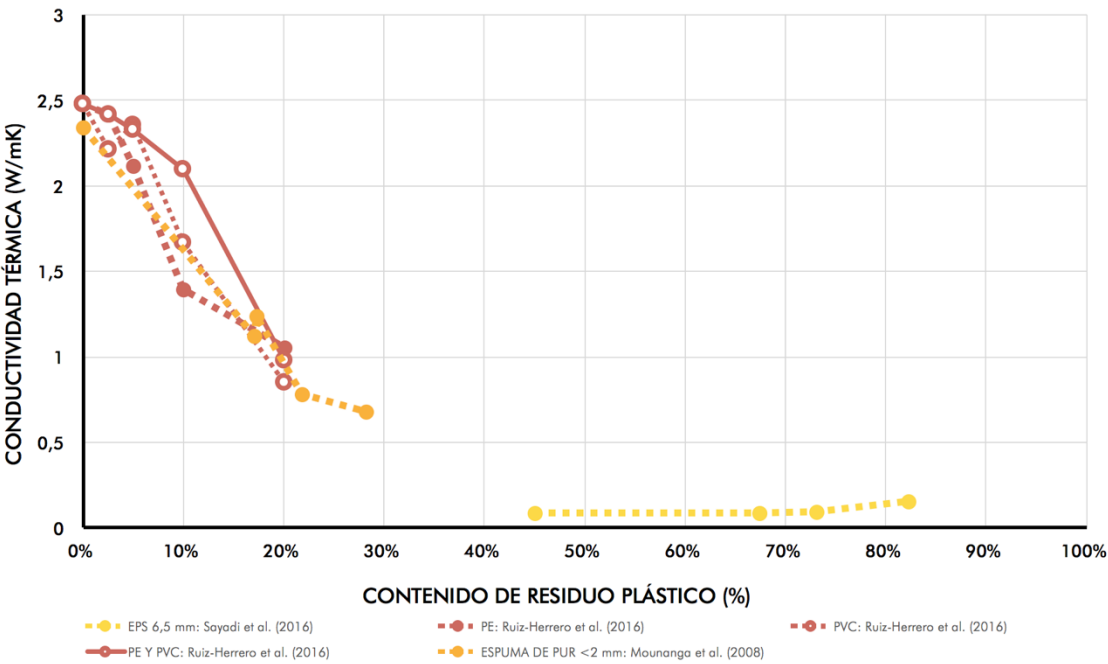


Fig. 18. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

5. RESIDUOS PLÁSTICOS EN MORTEROS DE CEMENTO

Los morteros de cemento son materiales de construcción realizado a partir de un conglomerante, el cemento, que se mezcla con agua, arena y aditivos, en su caso. Se utiliza como material de unión para la construcción de muros de fábricas, así como en la configuración de revestimientos (enfoscados).

Algunos autores han estudiado el efecto que produce la combinación del mortero de cemento con otros materiales, como residuos plásticos. Para llevar a cabo el análisis de la incorporación de residuos plásticos a morteros de cemento, se recurre al estudio y revisión de una serie de investigaciones desde el año 2010 hasta la actualidad, centradas en el tema en cuestión: Hannawi et al. (2010), Ghernouti y Rabehi (2012), Iucolano et al. (2013), Da Silva et al. (2014), Al-Tulaian et al. (2016), Ferrándiz Mas et al. (2012), Ferrándiz Mas et al. (2014), Coppola et al. (2016), Verdolotti et al. (2014), Ruiz-Herrero et al. (2016), Aattache et al. (2017), Badache et al. (2018), Wang y Meyer (2012) y Gadea et al. (2010).

Para cada caso se realiza un análisis de las propiedades de los distintos residuos que son incorporados a morteros de cemento, así como el proceso de preparación de los mismos. También, se recopila un estudio centrado en el análisis de los resultados a los que se llega en cada investigación.

5.1. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS EMPLEADOS. TIPOS, PROPIEDADES Y MÉTODOLÓGÍAS DE PREPARACIÓN PREVIA

Los trabajos analizados tienen como objetivo el desarrollo de nuevos materiales a partir de la incorporación a morteros de cemento de agregados finos y gruesos de PET (Hannawi et al., 2010; Iucolano et al., 2013; Ghernouti y Rabehi, 2012; Da Silva et al., 2014). Estos autores trabajan exclusivamente con agregados finos de este residuo mientras que, por su parte, Al-Tulaian et al. (2016), junto con Verdolotti et al. (2014), se centran en el estudio de la incorporación de fibras de PET. Otros autores trabajan con agregados finos de EPS (Ferrándiz Mas et al., 2012; Ferrándiz Mas et al., 2014), así como con agregados de PE (Aattache et al., 2017; Coppola et al., 2016). Estos investigadores trabajan con el PE como agregado fino. También, Coppola et al. (2016), además de Verdolotti et al. (2014), estudian las propiedades del PP como agregado, el primero en forma de agregado fino y el segundo en forma de fibra. Otras publicaciones se centran, además, en la adición de agregados finos y gruesos de PVC al mortero de cemento.

Por su parte, algunos investigadores estudian incorporar HDPE, HIPS y espuma de PUR, (Badache et al., 2018; Wang y Meyer, 2012; Gadea et al., 2010, respectivamente). Los agregados finos se trabajan con tamaños de partículas de hasta 4 mm, mientras que los gruesos oscilan entre 4 y 32 mm. Por su parte, la incorporación de fibras se da para una longitud entre 0 y 50 mm.

En la Tabla 5 se exponen los valores de densidad (densidad, densidad aparente y densidad de partículas), junto con otras propiedades obtenidas en cada trabajo estudiado. Se observa que todos los valores quedan por debajo de la densidad del mortero de cemento. Se obtienen unos valores de densidad comprendidos entre 13 y 2700 kg/m³ (Da Silva et al., 2014; Ferrándiz Mas et al., 2012; Ferrándiz Mas et al., 2014; Badache et al., 2018; Wang y Meyer, 2012; Gadea et al., 2010), de densidad aparente entre 300 y 730 kg/m³ (Hannawi et al., 2010; Ghernouti y Rabehi, 2012; Iucolano et al., 2013; Da Silva et al., 2014; Coppola et al., 2016) y de densidad de partículas resultan unos valores que oscilan entre 897 y 922 kg/m³ (Coppola et al., 2016). Por tanto, todos estos valores confirman que la adición de estos residuos plásticos contribuye a la reducción de la densidad de los nuevos compuestos.

Cabe mencionar el hecho de que Lucolano et al. (2013) estudian la sustitución de mortero de cemento por una mezcla de poliolefina basada en PE, PP y PET con el fin de desarrollar morteros hidráulicos con un nivel de porosidad mayor, aumentando con ello su capacidad aislante y minorando, consecuentemente su densidad.

Por otro lado, es necesario señalar que Ferrándiz Mas et al. (2012) estudian las propiedades de la adición de EPS a morteros de cemento junto con la incorporación de aditivos aireantes, retenedores de agua y fluidificantes para mejorar la trabajabilidad de los morteros. En un estudio posterior, estos autores analizan incorporar EPS junto con cenizas de lodo de papel (PSA), lo que requiere un aumento del uso de aditivos conforme incrementaba la presencia de PSA, con el fin de mantener una buena trabajabilidad en el compuesto.

Es necesario señalar la diferencia de trabajar con residuos plásticos en forma de agregados y la incorporación de fibras. El estudio con residuos plásticos en forma de áridos tiene como objetivo fundamental el desarrollo de compuestos aligerados, mientras que la adición de fibras trata de mejorar las propiedades mecánicas (Lucolano et al., 2013).

En la Fig. 19 se recogen los métodos que cada investigación ha llevado a cabo para la obtención y preparación de los residuos plásticos empleados. Existen muchos estudios que han realizado un proceso de reciclado mecánico directo mediante triturado, al tratarse de un procedimiento eficiente y económico (Ghernouti y Rabehi, 2012; Da Silva et al., 2014; Al-Tulaian et al., 2016; Ferrándiz Mas et al., 2012; Gadea et al., 2010). No obstante, otros autores han procedido a un método basado en la fusión para la preparación de los agregados: Ghernouti y Rabehi (2012) dan a las bolsas de plástico previamente obtenidas un tratamiento de calor, seguido de una fase de enfriamiento y triturado de las mismas; por su parte, Da Silva et al. (2014) llevan a cabo un proceso de triturado de los residuos y un posterior baño de calor a los mismos (proceso en el que se incorporan aditivos), para la obtención de escamas de PET, las cuales serán pasadas por un reactor de vacío, unida a una fase de extrusión y enfriamiento para la producción de bolitas de PET.

En cuanto a la preparación de las fibras, Al-Tulaian et al. (2016) cortaron las fibras en hebras finas y en las longitudes deseadas (20 y 50 mm) mediante una máquina diseñada para ello. Verdolotti et al. (2014) obtienen las fibras de PE, PP y PET a través de una central de residuos y las tamizarán mediante medios mecánicos para obtener los tamaños de fibra deseados (menores de 2 mm).

Cabe reseñar que todos estos procedimientos mecánicos van en detrimento de la filosofía del reciclaje de los residuos, al tratarse de métodos que consumen energía adicional, hecho que no contribuye a la mejora de las condiciones medioambientales.

Tabla 5. PROPIEDADES DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS INCORPORADOS EN EL MORTERO DE CEMENTO, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

No.	ARTÍCULO DE REFERENCIA	TIPO DE COMPUESTO	TIPO DE RESIDUO PLÁSTICO	TIPOS Y CANTIDADES DE SUSTITUCIÓN/FORMA	TAMAÑO DE PARTÍCULA/FORMA	DENSIDAD (D)/DENSIDAD APARENTE (DA)/DENSIDAD DE PARTÍCULAS (DP) (kg/m ³)	OTRAS PROPIEDADES
17	Hannawi et al. (2010)	MORTERO	PET Y PC	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 3,10,20,50% VOL.	PET_MENORES DE 10 mm PC_MENORES DE 10 mm	DA: 547 DA: 612	---
18	Ghemouri y Rabehi (2012)	MORTERO	---	AGREGADOS FINOS 10,20,30,40% PESO	ENTRE 0,1 Y 2,3 mm	DA: 530	---
19	lucalano et al. (2013)	MORTERO	MEZCLA DE POLIOLEFINA CON PET	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 10,15,20,25,33,50% PESO	MENORES DE 8 mm	DA: 300	---
20	Da Silva et al. (2014)	MORTERO	ESCAMAS Y PARTÍCULAS DE PET	AGREGADOS FINOS 5,10,15% VOL.	PF (ESCAMAS DE PET) ENTRE 1 Y 4 mm PP (PARTÍCULAS DE PET) ENTRE 1 Y 4 mm	DA:474; D:1280 DA: 730; D:1303	---
21	Al-Tulaian et al. (2016)	MORTERO	FIBRAS DE PET	FIBRAS_05,1,15% VOL.	LONGITUD: 20 mm Y 50 mm	---	---
22	Ferrández Mas et al. (2012)	MORTERO	EPS	AGREGADOS FINOS 10,30,50,70% VOL.	ESPS ₁ (POLIESTIRENO EXPANDIDO COMERCIAL)_NO RECICLADO_ DIÁMETRO>3 mm ESPS ₂ (POLIESTIRENO PREEXPANDIDO)_NO RECICLADO_ DIÁMETRO<3 mm ESPS _{3r} (POLIESTIRENO EXPANDIDO TRITURADO)_RECICLADO_ DIÁMETRO<1 mm ESPS _{3v} (POLIESTIRENO EXPANDIDO EN POLVO)_RECICLADO_ POLVO	D: 76 D: 52 D: 13 D: 22	---
23	Ferrández Mas et al. (2014)	MORTERO	EPS Y PSA	EPS_ AGREGADOS FINOS TRITURADOS Y EN POLVO_ 60% VOL. PSA_ AGREGADOS FINOS 10,20,30,40,50,60,70,80% VOL. (EPS TRITURADO) PSA_ AGREGADOS FINOS 10,20,30,40,50% VOL. (EPS EN POLVO)	EPS TRITURADO < 1 mm EPS EN POLVO < 0,5 mm PSA_ PARTÍCULAS CON MÁXIMOS DE 05, 4 Y 55'1 micras	D: 13 D: 22 D: 2700	ABSORCIÓN DE AGUA: 1-3% ABSORCIÓN DE AGUA: 1-3%
24	Coppola et al. (2016)	MORTERO	MEZCLA DE POLIOLEFINA CON PP Y PE	AGREGADOS FINOS 10,25% VOL (Y RELACIÓN A/C 0,40 Y 0,50)	LWA ENTRE 1,4 Y 2 mm LWA ENTRE 1 Y 1,4 mm LWA ENTRE 0,50 Y 1 mm LWA ENTRE 0,18 Y 0,50 mm	DP: 897; DA: 348 DP: 914; DA: 361 DP: 920; DA:387 DP: 922; DA: 402	---
25	Verdolotti et al. (2014)	MORTERO	PE,PP Y PET	FIBRAS 10,20,30% PESO	LONGITUD: MENORES DE 2 mm	---	---
26	Ruiz-Herrero et al. (2016)	MORTERO	PE Y PVC	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 2'5,5,10,20% VOL.	0/4, 0/8, 8/20 Y 8/32 mm	---	---
27	Aattache et al. (2017)	MORTERO	POLÍMERO DE PE	AGREGADOS FINOS 2,4,6% VOL.	ENTRE 80 micras Y 0,5 mm	---	---
28	Badache et al. (2018)	MORTERO	HDPE	AGREGADOS FINOS 15,30,45,60% VOL.	MENORES DE 3,15 mm	D: 922	MASA VOLUMÉTRICA APARENTE 362 kg/cm ³
29	Wang y Meyer (2012)	MORTERO	HIPS	AGREGADOS FINOS 10,20,50% VOL.	MENORES DE 4 mm	D: 1040	---
30	Gadea et al. (2010)	MORTERO	ESPUMA DE PUR	AGREGADOS FINOS 25,50,75,100% VOL.	ENTRE 0 Y 4 mm	D: 26±2	---

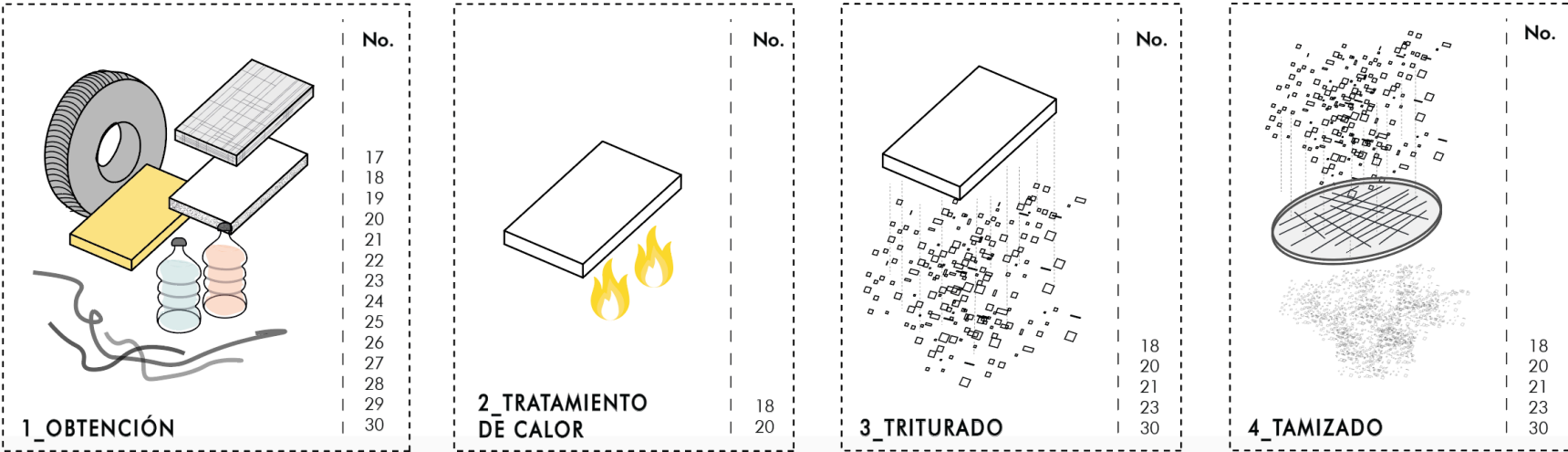


Fig. 19. MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS INCORPORADOS EN EL MORTERO DE CEMENTO, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

5.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES

Los trabajos centrados en el desarrollo de nuevos materiales basados en la incorporación de residuos plásticos a morteros de cemento han llevado a cabo una serie de ensayos que se recogen en la Fig. 20. El estudio de las propiedades físicas se basa fundamentalmente en el análisis de la densidad. En cuanto al estudio de las propiedades mecánicas, se llevan a cabo ensayos de resistencia a flexión, compresión y tracción, así como del módulo de elasticidad.

Por otro lado, la absorción de agua, junto con la retracción, la carbonatación y la permeabilidad al vapor de agua se estudian para el análisis de las propiedades relacionadas con la durabilidad. Además, se analizan otras propiedades relativas al comportamiento frente al fuego, a la microestructura de los nuevos compuestos y a la conductividad térmica de los mismos.

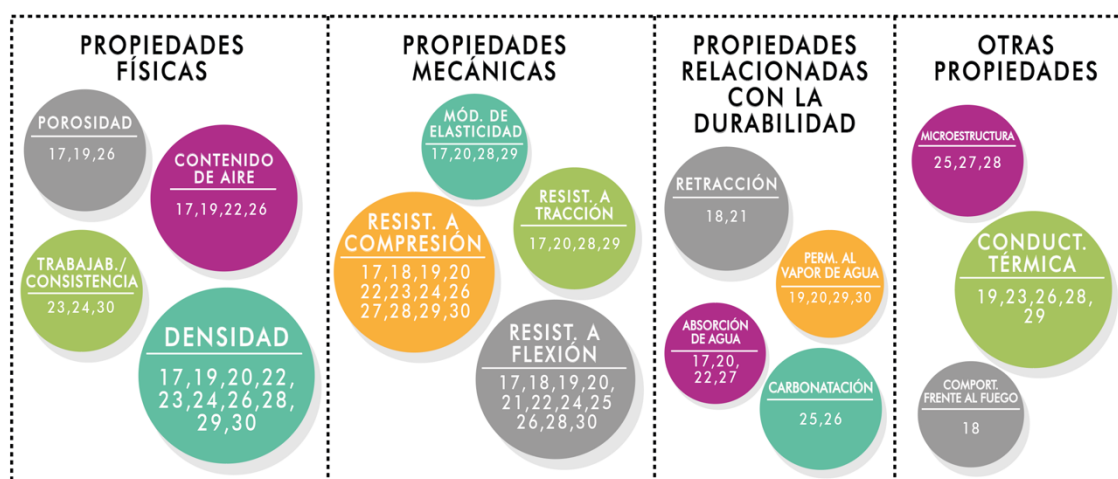


Fig. 20. ESTUDIOS SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS NUEVOS COMPUESTOS DE MORTEROS DE CEMENTO Y AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad

La densidad es propiedad fundamental para caracterizar el grado de ligereza de un material. La densidad aparente del mortero endurecido se estudia recurriendo a las normas EN-1015-6 (1999) y EN-1015-10 (1999), mediante probetas de 40x40x160 mm, tras curado a temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ y humedad relativa de $50 \pm 1\%$. No obstante, Wang y Meyer (2012) estudiaron esta propiedad atendiendo a la norma ASTM C 642-06 (2006), tras el previo secado de las muestras en horno a temperatura de 105°C durante 72h.

En la Fig. 21 se recogen los valores de densidad obtenidos por los distintos autores. En líneas generales, se observa que la densidad de los nuevos compuestos disminuye conforme aumenta el contenido de residuo plástico. Tal hecho podría deberse al incremento de residuo plástico, que presenta una densidad menor a la del mortero de cemento.

De la gráfica se advierte el hecho de que para porcentajes idénticos de sustitución, se obtienen valores mayores de densidad para las muestras con agregados de PC y PET, estudiadas por Hannawi et al. (2010), seguidos de las muestras con PP y PE (Coppola et al., 2016 y HDPE (Badache et al., 2018). Los menores valores de densidad aparecen en las muestras con adición de PET analizadas por Da Silva et al. (2014). Por tanto, a pesar de que dos investigaciones han estudiado un mismo agregado (PET), los resultados son bastante distantes entre ellos (Hannawi et al, 2010; Da Silva et al., 2014), quizás por los procedimientos efectuados para el tratamiento de los agregados o la propia preparación de las probetas.

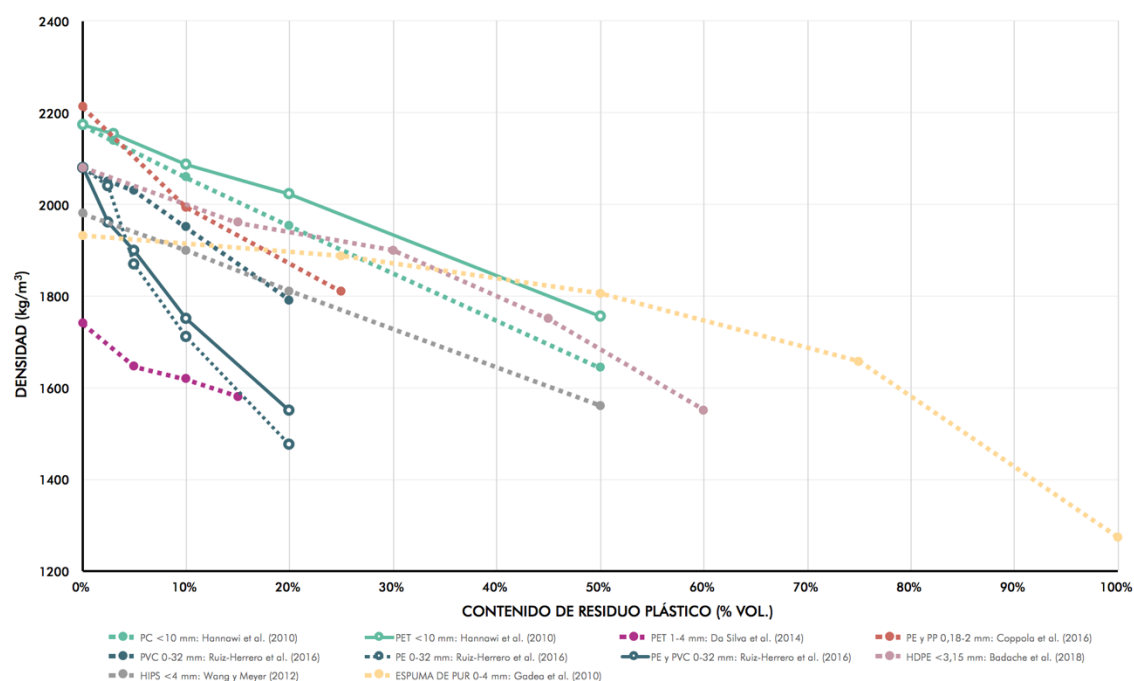


Fig. 21. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL MORTERO DE CEMENTO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

Ruiz-Herrero et al. (2016) estudian la incorporación a los morteros de cemento de PVC , PE y PVC y PE de manera conjunta. En la gráfica se observa que para los mismos porcentajes de sustitución la densidad disminuye menos cuando sólo se incorporan agregados de PVC que cuando se incluye PE, y PVC y PE, quedando los resultados de éste último en una situación intermedia. La reducción de las muestras con un 20% de PVC respecto a la de referencia es de un 13,94%, mientras que para las muestras con PE es de 29,03% y de un 25,48% para las que incluyen PE y PVC.

Otros autores han estudiado los efectos de la inclusión de aditivos junto con residuos plásticos a los morteros de cemento. Ferrándiz Mas et al. (2012) analizan la incorporación de EPS junto con aditivos aireantes, retenedores de agua y fluidificantes. Se concluye de ello que la presencia de aditivos en las muestras sin contenido de EPS supone una reducción de la densidad en la mayoría de los casos, siendo mayor en el caso de la incorporación de aireantes y menor con la adición de fluidificantes. Dicha disminución de la densidad se incrementa aún más con la incorporación de EPS y la diferencia es considerable respecto a las mismas muestras sin aditivos. Además, Ferrándiz Mas et al. (2014) estudian la incorporación de EPS y PSA, y obtienen que la densidad disminuye al aumentar el contenido de PSA.

Gadea et al. (2010) apuestan por la sustitución de la arena como agregado del mortero por espuma de PUR en un 0, 25, 50, 75 y 100%. Se obtiene una reducción del 34,11% de la muestra con el 100% respecto a la de referencia (0%).

Como conclusión, es posible mencionar que los resultados arrojados por los trabajos expuestos demuestran que la incorporación de residuos plásticos a morteros de cemento supone el desarrollo de nuevos materiales más ligeros.

Porosidad

La porosidad es una propiedad de los materiales que habla de la ligereza de los materiales. La Fig. 22 muestra los valores de porosidad obtenidos. En líneas generales, se observa que el incremento del contenido de residuo, supone un aumento de la porosidad y, consecuentemente, una reducción de la densidad del compuesto. Esta reducción de la densidad se justifica por el hecho de que los agregados plásticos no son absorbentes, lo que genera una mayor cantidad de agua libre en el mortero, cuya evaporación conlleva un mayor número de poros en la muestra y, por tanto, una mayor porosidad.

Se observa que la porosidad es mayor en el caso de las muestras de PC y PET de Hannawi et al. (2010) que las de PE, PVC y PE con PVC (Ruiz-Herrero et al., 2014) para porcentajes de sustitución menores al 20%. Sin embargo, para un 20% éstas últimas alcanzan valores por encima de los de las primeras.

Además, se aprecia que el aumento de la porosidad es más acentuado en unas muestras que en otras: mientras que las de PET aumentan su porosidad en un 1,91% y las de PC en un 2,53%, respectivamente, las muestras de PE y PVC lo hacen en un 61,82%, las de PVC en un 63,37% y las de PE en un 68,34%.

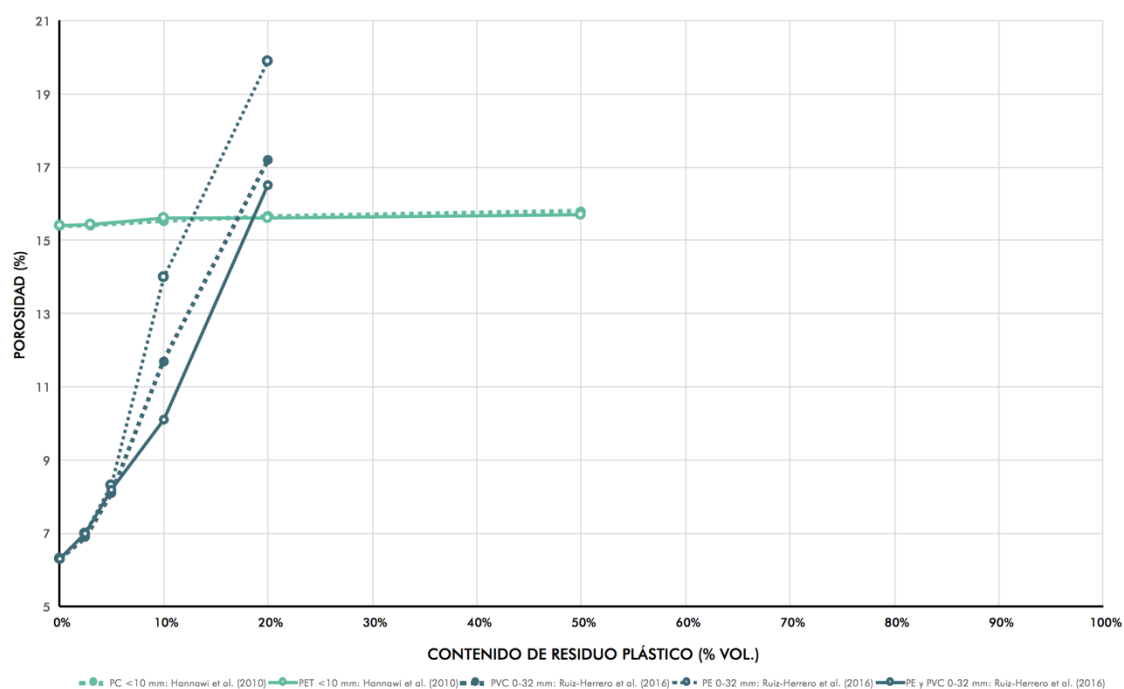


Fig. 22. VARIACIÓN DE LA POROSIDAD DEL MORTERO DE CEMENTO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

PROPIEDADES MECÁNICAS

Resistencia a flexión

Una de las propiedades fundamentales para la caracterización mecánica del mortero de cemento es la resistencia a flexión. El análisis de la resistencia a flexión se realiza mediante probetas prismáticas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, según las normas EN-1015-11 (1999) y UNE-EN 196-1:2005 (2005). Algunas investigaciones recurren a la norma ASTM C 78 (2010) y realizaron muestras prismáticas de $60 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ (Al-Tualian et al., 2016).

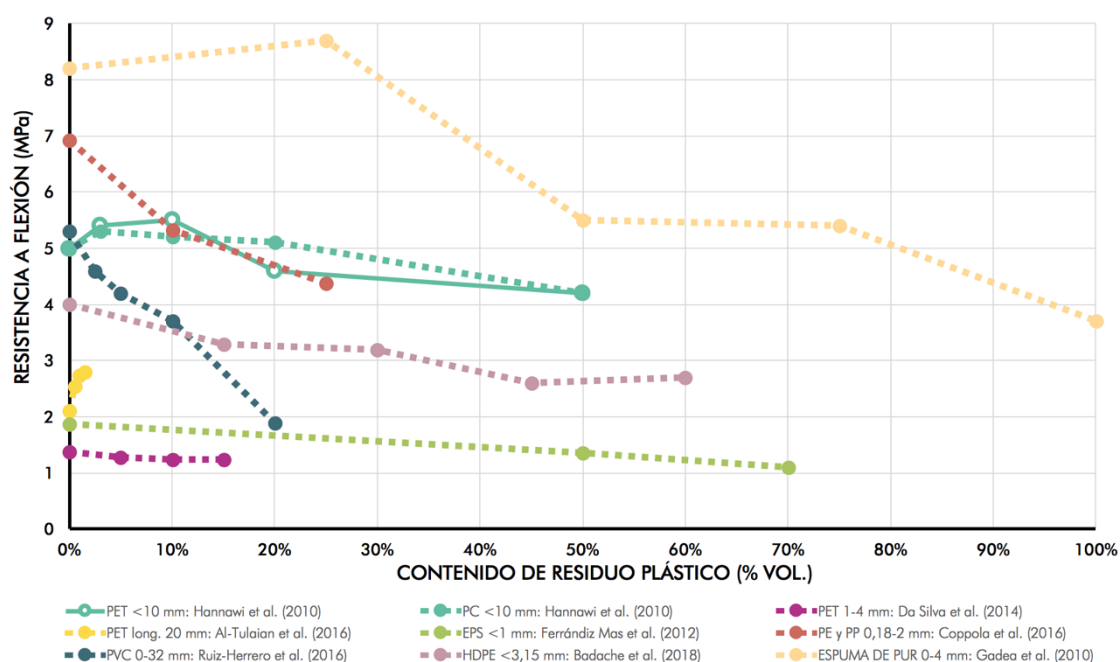


Fig. 23. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

En la Fig. 23 se exponen los resultados de resistencia a flexión obtenidos por los autores. En la mayoría de los casos, el incremento de residuo plástico en el mortero de cemento supone una disminución de la resistencia a flexión en las muestras.

En líneas generales, se observa que, para porcentajes de contenido de residuo plástico idénticos, se obtienen valores mayores de resistencia a flexión en aquellas muestras que contienen espuma de PUR (Gadea et al., 2010), mientras que los menores valores aparecen en las muestras de PET (Da Silva et al., 2014).

Los estudios centrados en la incorporación de agregados tipo PET arrojan resultados muy diferentes en cada caso. Los menores valores de resistencia a flexión se obtienen en el estudio de Da Silva et al. (2014), mientras que los mayores son obtenidos por Hannawi et al. (2010), quedando en un valor intermedio las muestras de Al-Tualian et al. (2016). En este caso se incorpora PET en forma de fibras con una longitud total de 20 mm con objeto de estudiar el efecto de refuerzo de las mismas en la resistencia a flexión, lo que resulta en un aumento de la misma conforme incrementa el contenido de fibras.

Las muestras con contenido de EPS (Ferrándiz Mas et al., 2012) presentan valores menores que aquellas que incluyen PVC (Ruiz-Herrero et al., 2016). La resistencia a flexión disminuye en un 40,64% en las muestras de EPS, mientras que en las de PVC la disminución es de un 64,15%. El estudio realizado con EPS por Ferrándiz Mas et al. (2012) también incorpora aditivos (aireantes, retenedores

de agua o fluidificantes) sobre la resistencia a flexión de las muestras. Se obtiene que con la incorporación de aditivos aireantes y retenedores de agua disminuye la resistencia, pero en el caso de los fluidificantes, ésta aumenta.

De todo ello extraemos la conclusión de que estos nuevos materiales desarrollados, en su mayoría, no podrían emplearse para usos estructurales.

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se estudia a partir de las normas En 1015-11 (1999) y UNE-EN 196-1:2005 (2005), sobre las medias probetas prismáticas previamente ensayadas a flexión. Otras investigaciones ensayan la resistencia a compresión atendiendo a la norma ASTM C39 / C39M-09a (2009) (Wang y Meyer , 2012).

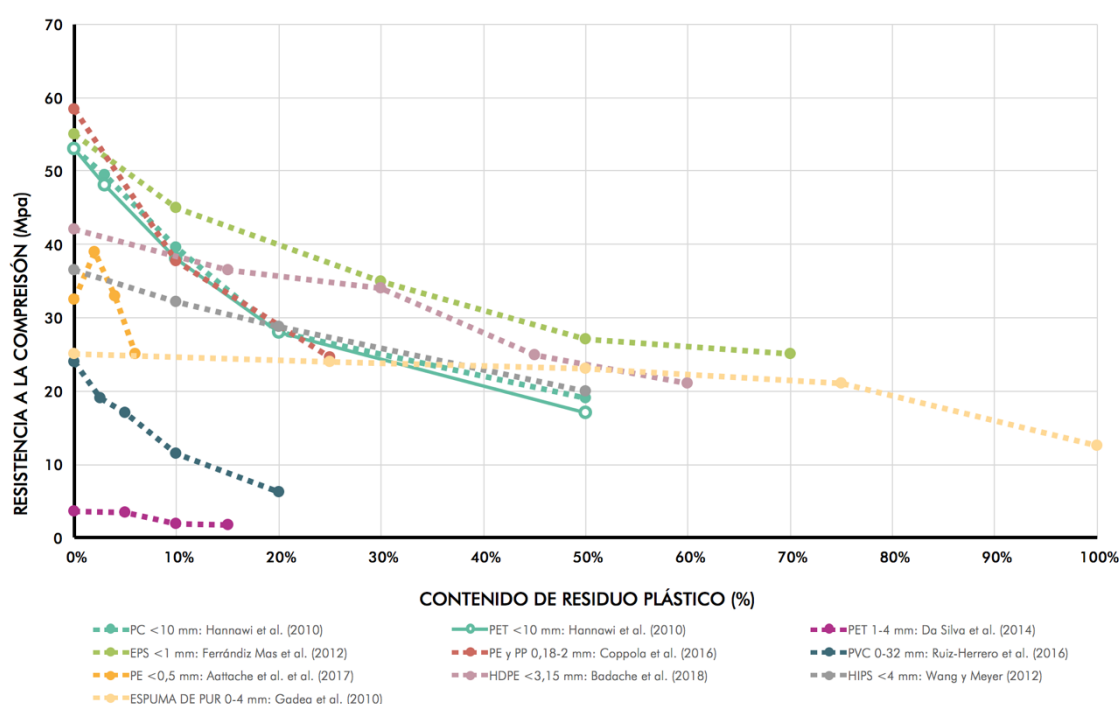


Fig. 24. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La Fig. 24 muestra los resultados obtenidos de resistencia a compresión en cada investigación. Se observa que la resistencia a compresión disminuye conforme aumenta el contenido de residuo plástico. No obstante, en el estudio llevado a cabo por Aattache et al. (2017) las muestras con un 2% PE incrementan su resistencia, pero un mayor porcentaje de sustitución mayor supone una disminución de esta resistencia.

En líneas generales, se advierte que para porcentajes de contenido de residuo idénticos, se obtienen valores mayores de resistencia a compresión en las muestras con EPS estudiadas por Ferrándiz Mas et al. (2012), seguidas de aquellas con HDPE (Badache et al. (2018), de PE y PC analizadas por Hannawi et al. (2010) y de PE con PP (Coppola et al., 2016). Los menores valores de esta resistencia se concluyen para las muestras con PVC (Ruiz-Herrero et al., 2016) y PET (Da Silva et al., 2014).

Esta disminución de resistencia es más pronunciada en algunos casos que en otros. Se observa una disminución del 67,93% para las muestras de PET respecto a la muestra de referencia, un 64,15% para las de PC y un 57,85% para las de PE y PP (Hannawi et al., 2010; Coppola et al., 2016), mientras que para las muestras de PE analizadas por Attache et al. (2017) informan de una reducción de la resistencia a compresión del 23,08% respecto a la muestra de referencia.

En el caso de las muestras de EPS, Ferrándiz Mas et al. (2012) estudian el efecto de la inclusión de aditivos aireantes, retenedores de agua y fluidificantes sobre la resistencia a compresión, lo cual también contribuye significativamente en la reducción de esta resistencia. Ferrándiz Mas et al. (2012) también trabajan en la incorporación de cenizas de lodo de papel (PSA) junto con el EPS al mortero de cemento, lo que también disminuye la resistencia a compresión.

Como conclusión, cabe señalar que los resultados arrojados concluyen las limitaciones de estos materiales desarrollados para su aplicación estructural.

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA DURABILIDAD

Absorción de agua

Para determinar la absorción de agua se ha recurrido a la siguiente expresión, extraída de la norma ASTM/C267 (1996):

$$\text{Absorción (\%)} = [(m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}) / m_{\text{sec}}] \times 100,$$

donde m_{sat} es la muestra saturada
y m_{sec} es la muestra seca

No obstante, Hannawi et al. (2010) analizaron esta propiedad siguiendo las recomendaciones de RILEM 49TER (RILEM 49TFR, 1984).

La Fig. 25 muestra los valores de la absorción de agua obtenida en cada investigación. Se observa que la absorción de agua aumenta al incrementar el contenido de residuos plásticos, debido al incremento de la porosidad que supone la incorporación de los mismos, derivado de la conexión débil entre el agregado y la matriz cementosa, lo que crea un compuesto con más poros susceptibles a llenarse de agua (Da Silva et al., 2014).

Para un mismo porcentaje de contenido de residuos se observa que las muestras de PE (Attache et al., 2017) obtienen valores mayores de porosidad, frente a las de PC y PET (Hannawi et al., 2010) y las de EPS (Ferrándiz Mas et al., 2012), siendo éstas últimas en las que se advierten los menores valores.

Se aprecia que el aumento de la porosidad es más significativo en las muestras de PE que en las demás, con un aumento del 30% respecto a la de referencia.

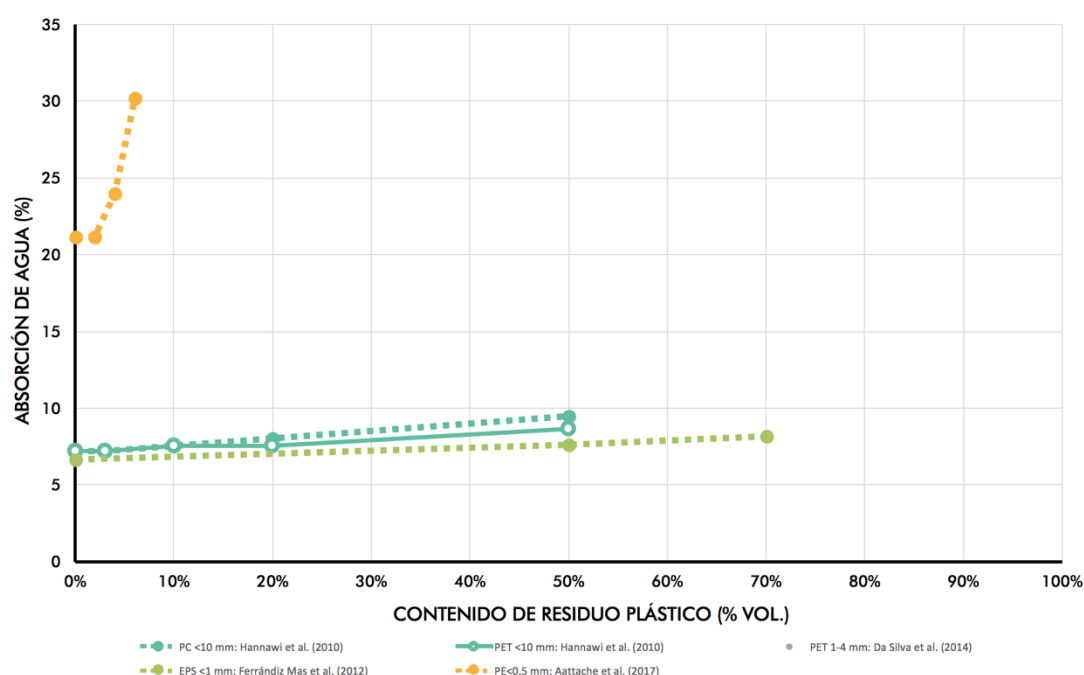


Fig. 25. VARIACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA DEL MORTERO DE CEMENTO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

OTRAS PROPIEDADES

Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad esencial para definir la capacidad aislante de un material. Algunos autores han estudiado esta propiedad en los nuevos materiales desarrollados (Ferrándiz Mas et al., 2014; Ruiz-Herrero et al., 2016; Badache et al., 2018; Wang y Meyer, 2012).

Para ello, han llevado a cabo diferentes ensayos, como la simulación de un flujo de calor unidimensional (Wang y Meyer, 2012) o la técnica de fuente de plano transitorio (Ruiz-Herrero et al., 2016), entre otras.

La Fig. 26 muestra los resultados obtenidos por los distintos investigadores. Se observa que la conductividad térmica disminuye conforme aumenta el contenido de residuo plástico. Se advierte que, para porcentajes de contenido de residuo idénticos, los valores mayores de conductividad térmica se obtienen en las muestras de HDPE (Badache et al., 2018), seguidas de aquellas con PVC, PE y PE con PVC (Ruiz-Herrero et al., 2016), resultando los menores valores para las muestras con contenido de HIPS (Wang y Meyer, 2012), en la que un 50% de contenido de residuo supone una reducción de la conductividad térmica del 55,74% respecto a la muestra de referencia.

Todo ello apoya el hecho de que la incorporación de residuos plásticos a morteros de cemento contribuye en el desarrollo de materiales, no sólo más ligeros y absorbentes, como se concluía en apartados anteriores, sino a la vez más aislantes.

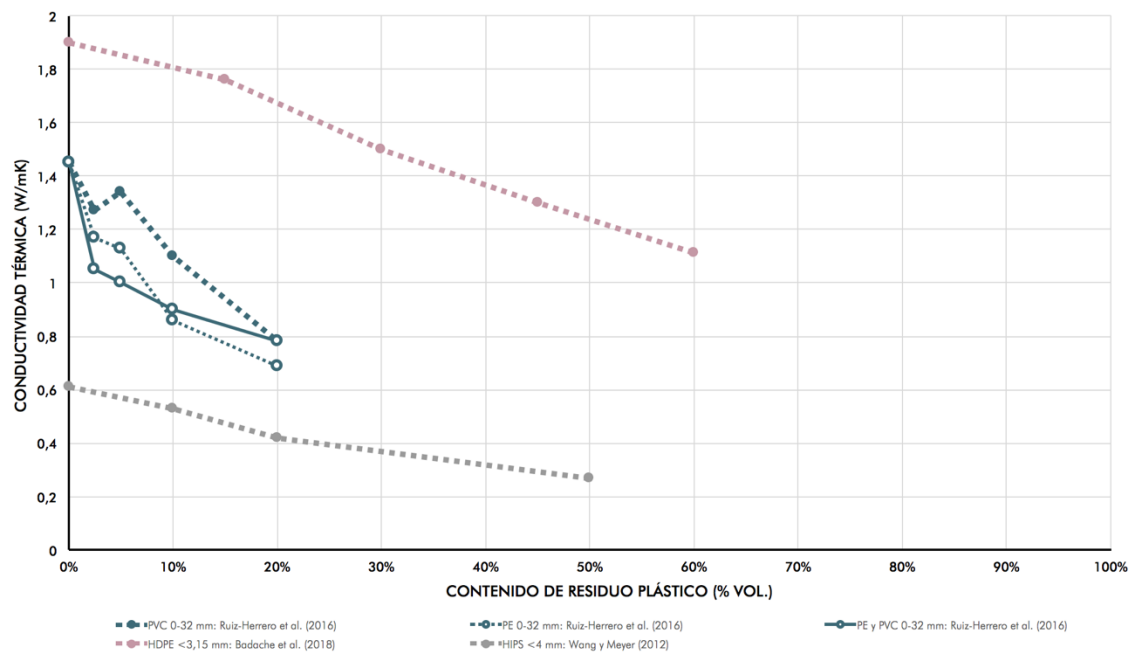


Fig. 26. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MORTERO DE CEMENTO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

6. RESIDUOS PLÁSTICOS EN YESOS

El yeso es un material de construcción que se obtiene a partir del mineral natural del yeso o sulfato de calcio dihidrato. La adición de agua hace de este un producto moldeable y útil en la conformación de revestimientos interiores, como guarnecidos, enlucidos, tendidos y estucos.

Algunos trabajos se centran en la incorporación de otros materiales, como residuos plásticos, a yesos. Para abordar el estudio sobre las posibilidades de reutilización de residuos plásticos mediante su adición a matrices de yeso, se procede al análisis de diversos trabajos científicos, todos ellos llevados a cabo a partir de 2006: Madariaga (2008); San-Antonio González et al. (2015); Bicer y Kar (2017); San-Antonio González et al. (2015); Del Río Merino et al. (2018); Karaman et al. (2006); Gutiérrez-González et al. (2012); Parres et al. (2009); Serna et al. (2009).

Se realiza un estudio de las propiedades y del proceso de preparación de los residuos plásticos seguidos en cada trabajo, así como un análisis de los distintos resultados que se obtienen de los ensayos realizados en los mismos.

6.1. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS EMPLEADOS. TIPOS, PROPIEDADES Y MÉTODOLÓGÍAS DE PREPARACIÓN PREVIA

Las investigaciones analizadas se han centrado en el desarrollo de nuevos materiales a partir de la incorporación a yesos, fundamentalmente, de poliestireno expandido (EPS), como es el caso de Madariaga (2008), que trabaja con agregados finos, al igual que Bicer y Kar (2017) y San-Antonio González et al., (2015), quienes apuestan a su vez por la incorporación de agregados plásticos gruesos. San-Antonio González et al. (2015) y Del Río Merino et al. (2018) trabajan con agregados finos y gruesos de XPS, respectivamente. No obstante, otros estudios analizan las propiedades de residuos de agregados finos y gruesos de PET (Karaman et al., 2006), agregados finos de espuma de PUR (Gutiérrez-González et al., 2012), partículas gruesas de caucho (Parres et al., 2009) y fibras y microfibras de poliamida (Serna et al., 2009). Se trabaja con unos tamaños de partículas entre 0 y 3 mm para agregados finos y entre 4 y 6 mm para agregados gruesos.

El estudio previo de la densidad de los residuos concluye que todos presentan menores valores de densidad que el yeso, con valores que oscilan entre 35-100 kg/m³ (San-Antonio González et al., 2015; San-Antonio González et al., 2015; Del Río Merino et al., 2018), así como unas densidades aparentes de 68 y 72 (Gutiérrez-González et al., 2012), lo que confirma que son adecuados para el desarrollo de yesos aligerados. Como consecuencia, las conductividades térmicas de los residuos son menores que las del yeso tradicional, oscilando entre 0,029 y 0,0346 W/mK, en el caso del EPS estudiado por San-Antonio González et al. (2015) y entre 0,033 y 0,036 W/mK en el estudio del XPS efectuado por San-Antonio González et al. (2015). Los tipos y propiedades de los distintos residuos plásticos se recogen en la Tabla 6.

Es necesario señalar la incorporación por algunos autores de diferentes aditivos y fibras junto con el residuo plástico. Así, San-Antonio-González et al. (2015) utilizan látex, aditivo de adhesión y plastificador como aditivos y fibras de vidrio y polipropileno con objeto de estudiar el refuerzo que suponen éstos al EPS respecto al yeso tradicional.

Por su parte, Bicer y Kar (2017) trabajan con muestras de yeso con adición de EPS y resina de tragacanto, con objeto de mejorar las propiedades térmicas y de aislamiento acústico del nuevo material. El tragacanto es una resina extraída del tallo de la planta Astragaluz que, además de actuar como buen adhesivo en el compuesto, cuando se sumerge en agua se hincha y expande tras 48 horas. Durante el período de secado, esta expansión da lugar a la formación de una serie de poros que aumentan la porosidad del compuesto a la vez que mejoran las propiedades térmicas y acústicas antes comentadas.

Cabe destacar que no sólo se emplean residuos en forma de agregados finos o gruesos. También se estudia la sustitución de yeso convencional por fibras de plástico (Parres et al., 2009). Concretamente, el yeso tradicional es sustituido por fibras y microfibras de poliamida procedentes de la industria textil y del neumático.

De forma esquemática, en la Fig. 27 se recogen los procedimientos seguidos para la preparación de los residuos plásticos. Como se observa, en ningún estudio se ha seguido un proceso de reciclado basado en la fusión. Las investigaciones que refieren el procedimiento de preparación previa del residuo optan por un método de reciclado mecánico directo, puesto que se trata de un procedimiento económico y eficiente para la obtención del agregado.

Dicho método ha consistido prioritariamente en el triturado (Madariaga, 2008; San-Antonio González et al., 2015; Gutiérrez-González et al., 2012; Parres et al., 2009) y tamizado (San-Antonio González et al., 2015; Del Río Merino et al., 2018; Parres et al., 2009; Serna et al., 2009) del residuo hasta el tamaño de partícula deseado.

Parres et al. (2009) hacen pasar las fibras por varias fases de triturado y tamizado para ir reduciendo el tamaño de las mismas (100, 20 y finalmente 0,2-7 mm). Las fibras de acero presentes en el proceso de triturado de las llantas fueron retiradas por electroimanes y todo el proceso de preparación del residuo se realizó sin procesos criogénicos y a temperatura ambiente. Este hecho confirma que el proceso seguido para el tratamiento de la poliamida ha consistido en un proceso mecánico directo de reciclado.

Por su parte, Gutiérrez-González et al. (2012) aplican un proceso de rayado o molienda a la espuma de PUR y determinan su tamaño granulométrico mediante difracción de granulometría láser.

Tabla 6. PROPIEDADES DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS INCORPORADOS EN EL YESO, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

No.	ARTÍCULO DE REFERENCIA	TIPO DE COMPUESTO	TIPO DE RESIDUO PLÁSTICO	TIPOS Y CANTIDADES DE SUSTITUCIÓN/FORMA	TAMAÑO DE PARTÍCULA	DENSIDAD (D)/DENSIDAD APARENTE (DA)/GRAVEDAD ESPECÍFICA (SG) (kg/m ³)	OTRAS PROPIEDADES
31	Madariaga (2008)	YESO	EPS	AGREGADOS FINOS 1'6,2,3% PESO	3,3-5 Y 5 mm	---	---
32	San-Antonio-González et al. (2015)	YESO	EPS (CON LÁTEX, ADITIVO DE ADHESIÓN, PLASTIFICADOR Y FIBRA DE VIDRIO Y DE POLIPROPILENO COMO ADITIVOS)	EPS: 2% VOL., LÁTEX (L): 1,5,10% PESO, ADITIVO DE ADHESIÓN (B): 1,5,10% PESO, PLASTIFICADOR (P): 0,6% FIBRA DE VIDRIO (GF): 2,5% PESO Y FIBRA DE POLIPROPILENO (PF): 2,5% PESO	AGREGADOS FINOS ENTRE 1 Y 2 mm AGREGADOS GRUESOS ENTRE 2 Y 4 mm	D:35-100	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA 0,029 W/mK-0,0346 W/mK
33	Bicer y Kar (2017)	YESO	EPS Y TRAGACANTO	EPS_AGREGADOS FINOS 20,40,60,80% VOL. TRAGACANTO_RESINA_0,05,1,1'5% VOL.	ENTRE 0 Y 3 mm	---	---
34	San-Antonio-González et al. (2015)	YESO	XPS	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 1,2,3,4% PESO	1-2, 2-4 Y 4-6 mm	D: 35-100	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA 0,033 W/mK-0,036 W/mK
35	Del Rio Merino et al. (2018)	YESO	XPS	AGREGADOS GRUESOS 1,2,3% PESO	ENTRE 4 Y 6 mm	D: 35	---
36	Karaman et al. (2006)	YESO	PET	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 5,10,15,20% VOL.	0-2, 2-4 Y 4-6 mm	---	---
37	Gutiérrez-González et al. (2012)	YESO	ESPUMA DE PUR	AGREGADOS FINOS 0,5/1, 1/1, 2/1, 3/1, 4/1 VOL.	ESPUMA GRIS MENORES DE 1,75 mm ESPUMA BLANCA MENORES DE 1,75 mm	DA: 68 DA: 72	---
38	Parres et al. (2009)	YESO	FIBRAS Y MICROFIBRAS DE POLIAMIDA	FIBRAS 1,2,4% PESO	LONGITUD: ENTRE 0,2 Y 7 mm	---	---
39	Serna et al. (2012)	YESO	CAUCHO	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS 1,3,5% VOL.	ENTRE 0-1, 1-2, 2-4mm	---	---

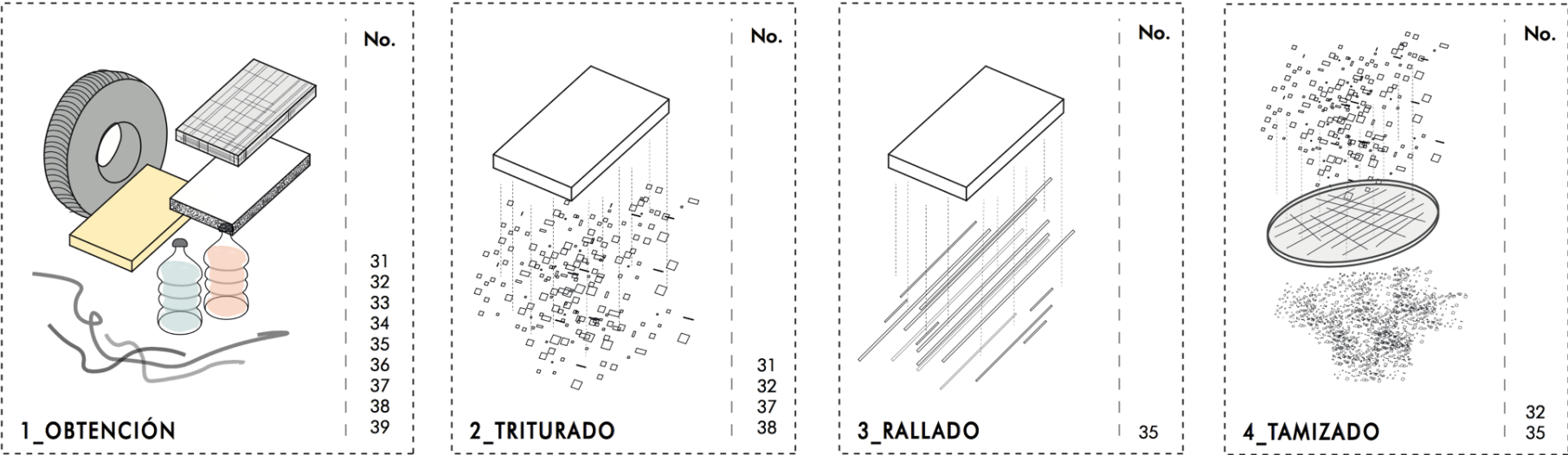


Fig. 27. MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS INCORPORADOS EN EL YESO, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

6.2. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS RESULTANTES

Las investigaciones analizadas llevan a cabo los ensayos que se recogen en la Fig 28. El análisis de las propiedades físicas de los nuevos materiales se basa fundamentalmente en el estudio de la densidad. Por su parte, el estudio de las propiedades mecánicas recoge el análisis de la resistencia a la compresión, la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción. En cuanto a las propiedades relacionadas con la durabilidad de los nuevos materiales se estudian principalmente la permeabilidad al vapor de agua y la absorción de agua. También, se han estudiado otras propiedades relacionadas con la microestructura, el comportamiento frente al fuego y la conductividad térmica.

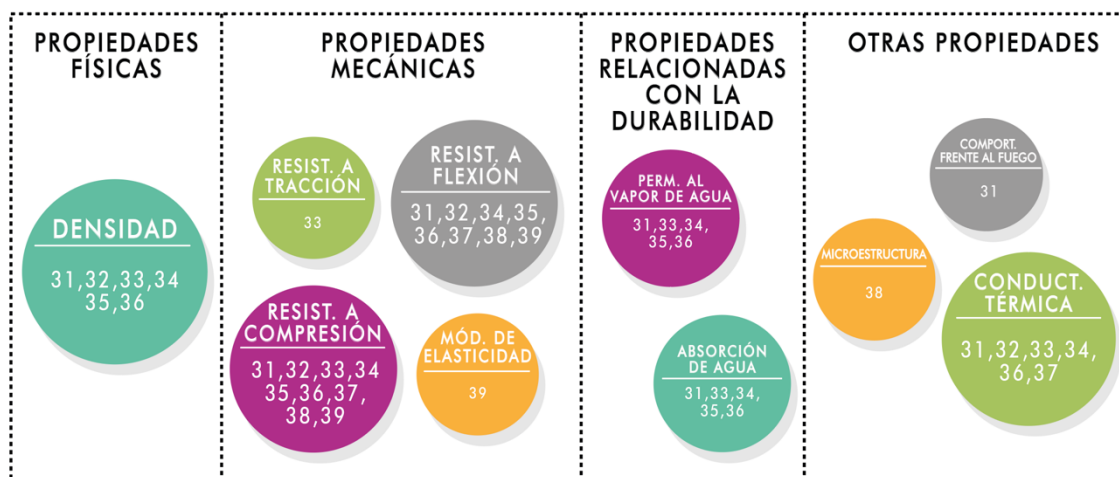


Fig. 28. ESTUDIOS SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS NUEVOS COMPUESTOS DE YESOS Y AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad

La densidad es una de las propiedades físicas de mayor relevancia para definición de la ligereza de los materiales. Su análisis se realiza según norma UNE-EN 102042 (2014). Para ello se realizan probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm³ para cada hipótesis o porcentaje planteado, según norma UNE-EN 13279-2 (2006). Una vez realizadas las probetas, se conservan durante 7 días en laboratorio (atmósfera con temperatura de 23±2 °C y humedad relativa de 37±1%) y almacenan a 60±2°C en una estufa, con objeto de obtener una masa constante (Del Río Merino et al., 2018; San-Antonio-González et al., 2015).

La Fig. 29. recoge los valores de densidad de los compuestos analizados por sus autores. Se observa que en todos los estudios el incremento del contenido de agregado plástico en la muestra supone una disminución de la densidad. Esta reducción es el resultado de la sustitución del yeso por el agregado plástico. La gráfica informa de que, para porcentajes idénticos de contenido de residuo plástico, la densidad es mayor en las muestras de espuma blanca de PUR (Gutiérrez-González et al., 2012), seguidas de las de PET, EPS (Karaman et al., 2016; Bicer y Kar, 2017, respectivamente), obteniéndose las menores densidad en las muestras de XPS de Del Río Merino et al. (2018) y San-Antonio-González et al. (2015).

Bicer y Kar (2017) informaron que la sustitución de yeso por partículas de EPS entre 0-3 mm, en proporciones entre 20% y 80% del volumen, provoca una reducción del 51,56%, pasando de 1088 kg/m³ a 527 kg/m³. Otros autores han estudiado la incorporación de EPS y aditivos al yeso, para

analizar el incremento de refuerzo que éstos suponen. San-Antonio-González et al. (2015) comprobaron que la adición de aditivos (látex, aditivo de adhesión y plastificador) y de fibras (vidrio y polipropileno) implican un aumento de la densidad respecto a la adición exclusiva de EPS. No obstante, la densidad del compuesto resultante siempre es menor a la de referencia (0% de residuos plásticos), por lo que se seguiría hablando de compuestos aligerados.

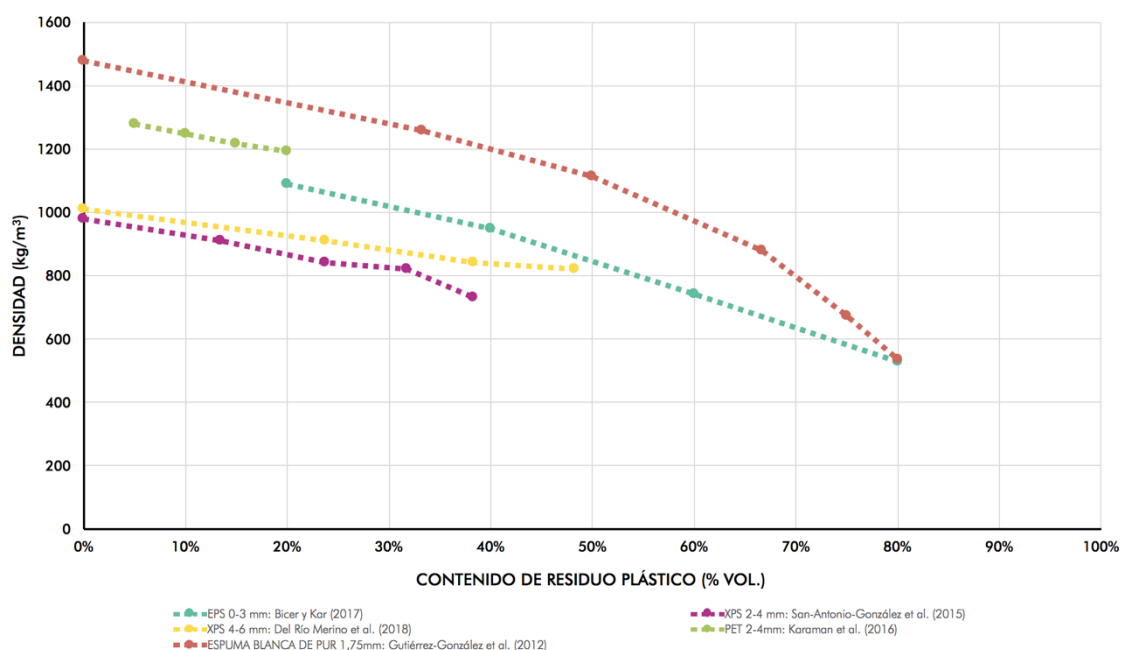


Fig. 29. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL YESO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

En cuanto al estudio del XPS, San-Antonio-González et al. (2015), consiguen una reducción de la densidad del 25,52% para un 52,46% de agregados de XPS respecto a la muestra de referencia, mientras que Del Río Merino et al. (2018) informan de una disminución del 18,81% para muestras con un 72,85% de EPS. Ambos trabajan con partículas entre 4 y 6 mm.

Otros autores estudian la densidad del compuesto de matriz yeso con adición de PET. Karaman et al. (2016) añade partículas de PET entre 2 y 4 mm y logra una reducción de la densidad del 6,65% para un 20% de PET añadido respecto a un 5%.

Por su parte, Gutiérrez-González et al. (2012) estudian la espuma blanca de PUR procedente de la construcción y la demolición y obtienen que la densidad disminuye en un 63,78% respecto a la de referencia, pasando de 1477 kg/m³ a 535 kg/m³.

Se observa que, a pesar que la incorporación de agregados plásticos al yesos (o sustitución del mismo) supone una reducción de la densidad del compuesto, las muestras con espuma de PUR, seguidas de las de PET presentan una mayor densidad que aquellas con EPS y XPS.

También se advierte que las muestras estudiadas por Bicer y Kar (2017) con un 20% y 40% de EPS tienen una densidad mayor a las de XPS. Sin embargo, al aumentar el porcentaje de EPS a un 60% y 80%, la densidad es menor que la de las muestra con XPS (741 kg/m³ para las muestras de EPS al 60%; 527 kg/m³ para el 80% de EPS; 820 kg/m³ para el 72,85% de XPS). La misma consecuencia también se observa en las muestras de espuma de PUR estudiadas por Gutiérrez-González et al. (2012), en las que disminuye considerablemente la densidad con el aumento del contenido de PUR. Estos hechos podrían deberse a que para porcentajes menores de agregado plástico, prevalecía la densidad del yeso en la densidad total de la mezcla, pero al aumentar el contenido de residuo plástico, éste condiciona la densidad principal de la mezcla. Como la densidad del XPS es mayor a la del EPS, hace que la densidad de las muestras con adición de XPS sea mayor a las que contienen EPS.

Con todo ello se concluye que la incorporación de agregados plásticos permite el desarrollo de yesos aligerados.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Resistencia a flexión

Los valores de resistencia a flexión se determinan mediante la rotura de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm³, según norma EN 13279-2 (2006). Sin embargo, Bicer y Kar (2017) analizarán la resistencia a flexión en cubos prismáticos de 100 x 100 x 100 mm³.

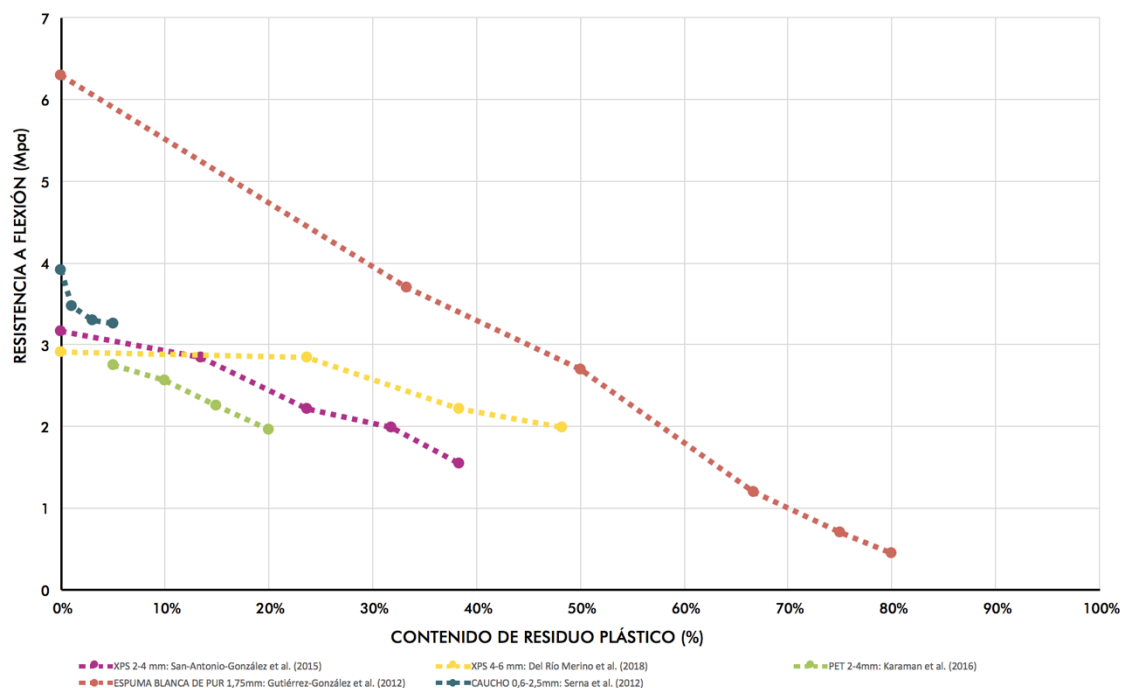


Fig. 30. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL YESO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

En la Fig. 30 se recogen los resultados de resistencia a flexión obtenidos en cada investigación. Se observa que conforme aumenta el contenido de residuos plásticos disminuye la resistencia a la flexión.

La gráfica revela que, en líneas generales, para porcentajes idénticos de contenido de residuo plástico, los mayores valores de resistencia a flexión se obtienen en las muestras con espuma de PUR (Gutiérrez-González et al., 2012), seguidos de las de caucho de Serna et al. (2012), XPS (San-Antonio-González et al., 2015; Del Río Merino et al., 2018), resultando los menores valores de resistencia a flexión para las muestras de PET de Karaman et al. (2016).

Por otro lado, cabe citar que para porcentajes de sustitución elevados de espuma de PUR se alcanzan unas resistencias inferiores a las muestras estudiadas con XPS (San-Antonio-González et al., 2015; Del Río Merino et al., 2018). La reducción de la resistencia a la flexión para un 80% de espuma de PUR respecto a la de referencia es de 92,85%, diferencia mayor que las de las muestras con XPS: las muestras de San-Antonio-González et al. (2015) disminuyen en un 51,26% para un porcentaje de sustitución del 38,30% respecto a la de referencia y las de Del Río Merino et al. (2018) un 31,61% (muestra con un 48,23% de porcentaje de sustitución respecto al de referencia).

Los estudios realizados con adición de goma de caucho a yesos por Serna et al. (2012) informan que para porcentajes de sustitución de 1, 3 y 5% se obtienen valores de resistencia similares al de referencia con una disminución total del 16,84%. Los menores valores de resistencia resultan del estudio de Karaman et al. (2016), en el que se reduce la resistencia a flexión un 28,72% para muestras entre 5 y 20% de PET.

No obstante, a pesar del descenso de la resistencia a flexión que muestran los nuevos compuestos, se advierte que la mayoría de las muestras cumplen con la Norma Europea EN 13279-1(2009), que establece 1 N/mm² como resistencia a flexión mínima.

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión, junto con el resto de propiedades mecánicas, dependen de la densidad del compuesto y de la granulometría empleada para el mismo (Gutiérrez-González et al., 2012). Los valores de resistencia a compresión se determinan a partir de las dos mitades de las probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm³ previamente rotas en el ensayo a flexión, atendiendo a la norma UNE-EN 13279-2 (2006). Sin embargo, Bicer y Kar (2017) analizarán esta propiedad en cubos prismáticos de 100 x 100 x 100 mm³, según norma ASTM C 109-80 (1983).

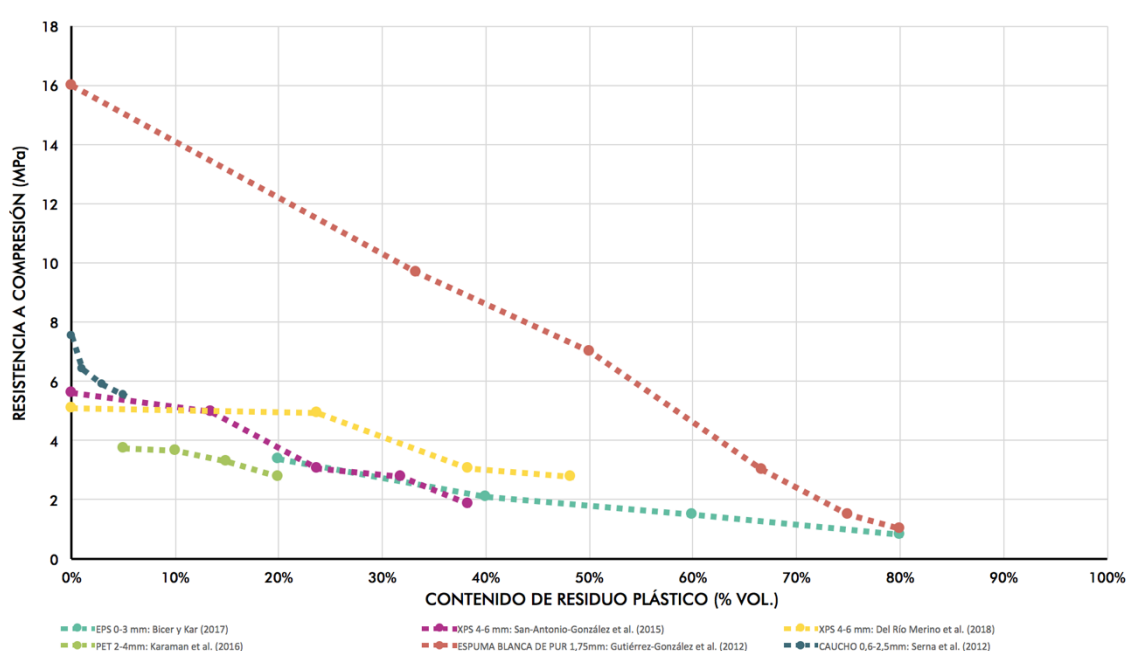


Fig. 31. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL YESO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La Fig. 31 muestra los valores de resistencia a la compresión obtenido por los distintos autores. Se observa que la resistencia a compresión disminuye conforme aumenta el contenido de agregados plásticos en las muestras.

Se advierte que, para porcentajes de contenido de residuos plásticos idénticos, los valores mayores de resistencia a compresión se obtiene con la incorporación de espuma de PUR (Gutiérrez-González et al., 2012) y los menores con la adición de partículas de PET (Karaman et al., 2016), quedando en unos valores intermedios los estudios centrados en EPS y XPS (Bicer y Kar, 2017; San-Antonio-González et al., 2015; Del Río Merino et al., 2018, respectivamente).

Concretamente, los mayores valores se alcanzan para las muestras con 30% y 50% de espuma de PUR estudiadas por Gutiérrez-González et al. (2012), con valores de 9,7 y 7 MPa, respectivamente. Se observa del mismo estudio un descenso del 93,75% entre la muestra con 80% de espuma de PUR y la de referencia.

Por su parte, los resultados de Serna et al. (2012) exponen un notable descenso de la resistencia respecto a la de referencia, concretamente un 26,52%.

Bicer y Kar (2017) informan que pasar de un 20% a un 80% de agregados de EPS supone una disminución del 75,81% de la resistencia a la compresión. A su vez, estos autores estudian los efectos de la adición de tragacanto a las muestras y observan que con la incorporación del 1,5% de tragacanto en las muestras con un 40% de EPS implica una disminución del 62,85% (2,10 MPa para 20%EPS y 0,78 MPa para 20%EPS+1,5%Tragacanto). También San-Antonio-González et al. (2015) comprobaron que la adición de aditivos (aditivo de adhesión y plastificador) y de fibras (vidrio y polipropileno) implican un aumento de la resistencia respecto a la adición exclusiva de EPS variable entre 21% y 120%, aunque el látex provocaba un descenso de la misma.

Por otro lado, San-Antonio-González et al. (2015) y Del Río Merino et al. (2018) estudian la resistencia a compresión que resulta de la incorporación de partículas de 4-6 mm de XPS a yesos. Mientras que los primeros autores informan de una reducción de la resistencia del 67,08% para una muestra con 52,46%XPS respecto a la muestra de referencia (sin XPS), los segundos exponen que la resistencia es menor en un 45,78% para 72,85%XPS.

Cabe señalar que varias muestras no cumplen con la Norma Europea EN 13279-1(2009), que define 2 N/mm² como resistencia a la compresión mínima. Todo ello confirma que estos nuevos compuestos son más adecuados para revestimientos interiores, con funciones decorativas, que para su aplicación como material estructural.

OTRAS PROPIEDADES

Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad fundamental puesto que influye en la capacidad de aislamiento de los materiales. San-Antonio-González et al. (2015) y Gutiérrez-González et al., (2012) estudian esta propiedad según norma EN 12667 (2001), empleando el método de placa calefactora protegida y medidor de flujo de calor, que implica mantener una relación constante entre la densidad de flujo de calor en el interior de las muestras de 300 x 300 x 30 mm³ y una serie de caras planas paralelas. Las muestras fueron secadas hasta alcanzar los 35°C. Por su parte, Bicer y Kar (2017) elaboraron muestras de 20 x 60 x 150 mm³ para analizar la conductividad térmica. El estudio se realizó según las normas DIN 51046 (2008).

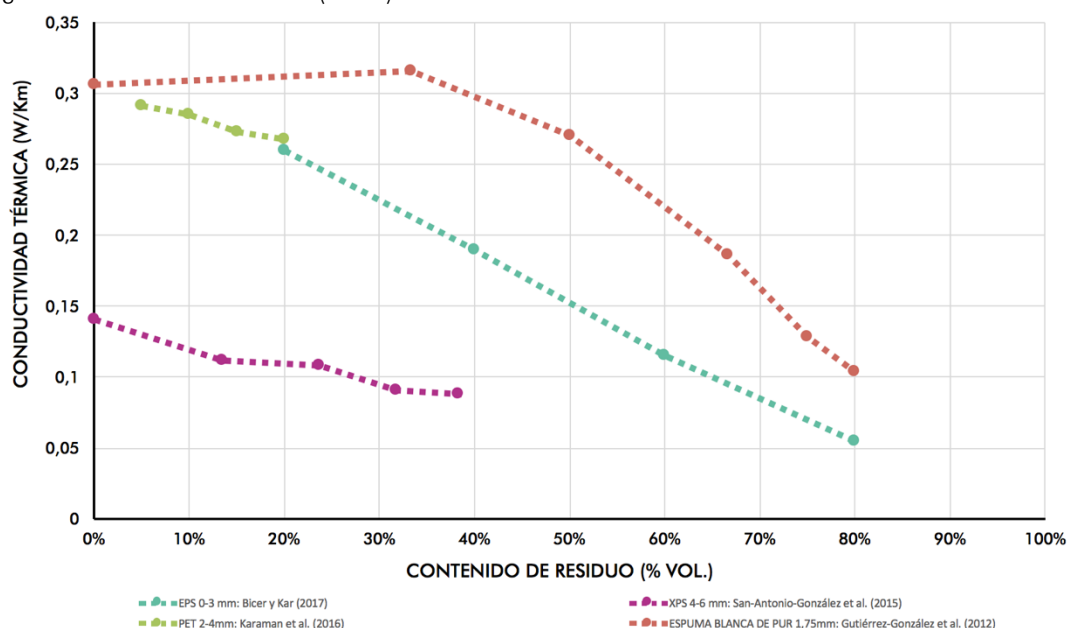


Fig. 32. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL YESO CON AGREGADOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La Fig. 32 muestra los valores de conductividad térmica obtenidos en cada trabajo. Se observa que la conductividad térmica disminuye conforme aumenta el contenido de residuos plásticos, lo que indica que su incorporación al yeso incrementa la capacidad de aislamiento de los nuevos compuestos. La gráfica revela que para porcentajes de contenido de residuo plástico idénticos la conductividad térmica es mayor para las muestras de espuma blanca de PUR de Gutiérrez-González et al. (2012), seguidas de las de PET y EPS (Karaman et al., 2016; Bicer y Kar, 2017, respectivamente), obteniéndose los menores de esta propiedad en las probetas con XPS de San-Antonio-González et al. (2015).

Por otro lado, las muestras de XPS de San-Antonio-González et al. (2015) obtienen una disminución del 37,59%, respecto a la muestra de referencia.

Se observa, además, que la adición de EPS supone un descenso de la conductividad del 78,84% (Bicer y Kar, 2017), con la que se consigue el menor valor de conductividad térmica estudiado, 0,055 W/mK para 80%EPS, inferior al valor habitual de coeficiente de conductividad térmica de los materiales de aislamiento (0,2 W/mK), valor de gran relevancia para la evaluación del rendimiento térmico de un material (Zhang et al., 2016). También se ha estudiado el efecto de la adición de resina de tragacanto sobre la conductividad térmica de los nuevos compuestos, la cual reduce en cierta medida el valor de la misma: para una muestra con 40% EPS se advierte una conductividad térmica de 0,190 W/mK, mientras que para una muestra con 40%EPS+1,5%Tragacanto se obtiene un valor de 0,146 W/mK, por tanto, una reducción del 23,16%.

También, la incorporación de espuma blanca de PUR supone una notable disminución de la conductividad, advirtiéndose un 66,01% de reducción respecto a la muestra de referencia (Gutiérrez-González et al., 2012).

Cabe señalar que, a partir de las Fig. 29 y 32, es posible hacer una relación entre la densidad y la conductividad térmica, de tal forma que a mayor cantidad de residuos plásticos, menor es la densidad y la conductividad térmica, por lo que la incorporación de residuos plásticos supone el desarrollo de materiales con una mayor capacidad de aislamiento y que aportan un menor peso al edificio, lo que podría ayudar a reducir el daño de los edificios ante situaciones de sismo (Bicer y Kar, 2017).

7. NUEVOS MATERIALES. APLICACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Una vez analizado los efectos que supone la incorporación de residuos plásticos a hormigones, morteros de cemento y yesos, se hace necesario determinar el alcance práctico de estas investigaciones. Es por ello que a continuación se relacionan las propuestas de los distintos trabajos en cuanto a la generación de productos y posibles aplicaciones de los nuevos materiales concebidos.

7.1. HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS



Fig. 33. APLICACIONES DE LOS MATERIALES DESARROLLADOS DE HORMIGÓN Y RESIDUOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La Fig. 33 expone esquemáticamente las aplicaciones de los nuevos materiales de matriz hormigón recogidas en los distintos trabajos. Es necesario señalar que, en la mayoría de los estudios, los resultados obtenidos confirman las limitaciones mecánicas y resistentes de los nuevos productos con residuos plásticos, así como las amplias posibilidades en el caso de ser empleados como revestimientos aligerados con grandes capacidades de aislamiento térmico.

Manjunath (2015) y Bulut y Şahin (2017) estudian la incorporación de e-plástico al hormigón. No obstante, en el primer trabajo se propone el posible uso del nuevo compuesto en fachadas. Además, la ductilidad del nuevo hormigón junto con e-plástico resulta un material eficaz para el desarrollo de hormigones resistentes a condiciones climáticas adversas. Sin embargo, Bulut y Şahin (2017) determina que el aumento de la ductilidad del hormigón con la incorporación de e-plástico y resina de poliéster, supone su posible aplicación para la reparación de carreteras de hormigón y asfalto.

Por su parte, las muestras de hormigón y PET de Albano et al. (2009) pueden ser aplicadas como sub-base de carreteras. Además, debido al aumento de la absorción de agua que experimentan las muestras con el incremento de agregados PET, éstas podrían ser empleadas en la conformación de canchas deportivas, así como de pavimentos que precisan de un buen drenaje.

Además, Saikia y De Brito (2014) concluyen que el aumento de la resistencia a la abrasión de los nuevos compuestos (hormigón y PET) plantea la posibilidad de usarlos en la creación de pavimentos y en estructuras hidráulicas.

En cuanto a las muestras de hormigón con fibras de plástico y PP, Ghernouti et al. (2015) concluyen que pueden emplearse en la mejora de las propiedades mecánicas de hormigones autocompactantes.

Por otro lado, Mounanga et al. (2008) concluye que los compuestos desarrollados de hormigón con espuma de PUR pueden mejorar sus propiedades mecánicas con la incorporación de minerales reactivos (escoria de alto horno, humo de sílice o cenizas volantes), en lugar de relleno de piedra caliza.

7.2. MORTERO DE CEMENTO CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

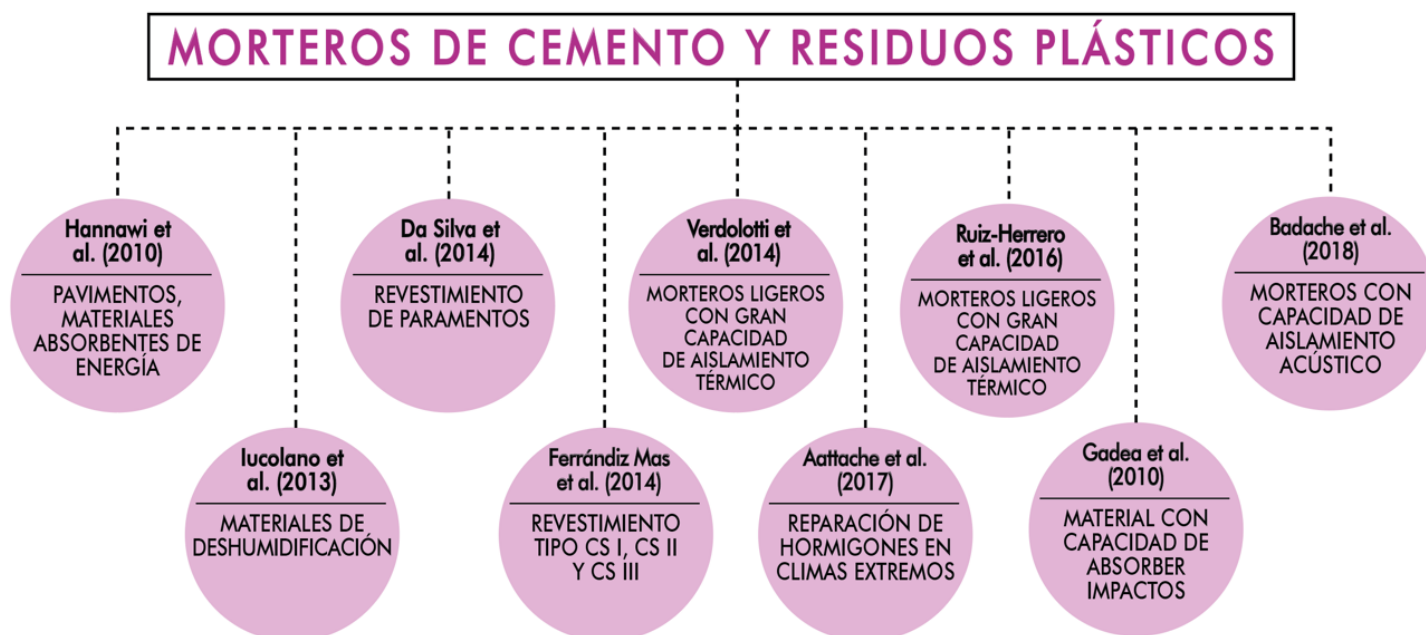


Fig. 34. APLICACIONES DE LOS MATERIALES DESARROLLADOS DE MORTERO DE CEMENTO Y RESIDUOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

La Fig. 34 expone las propuestas de cada trabajo para futuras aplicaciones de los compuestos desarrollados. En este caso, los resultados de los distintos ensayos concluyen que su aplicación estructural es muy reducida, pero su uso como material ligero y aislante es prometedor.

En primer lugar, la disminución del módulo de elasticidad de las muestras de mortero de cemento con el aumento de PC y PET de Hannawi et al. (2010) confirma que pueden ser empleadas en la conformación de pavimentos. Además, los resultados concluyen que la incorporación de PC y PET a materiales de matriz cementicia puede suponer el desarrollo de materiales con grandes capacidades para absorber energía para su aplicación en estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos.

En cuanto a las muestras de Iucolano et al. (2013) de mortero de cemento con poliolefina y PET, es necesario destacar que su baja resistencia al vapor de agua las hace potencialmente eficaces para el desarrollo de materiales de deshumidificación.

Además, las muestras de EPS y PSA (Ferrándiz Mas et al. (2014) permiten el desarrollo de morteros para revestimientos tipo CS I (con 30% y 60% de PSA, y EPS molido), CS II (con 30% de PSA y EPS en polvo) y CS III con EPS molido o en polvo.

Por otro lado las muestras de PE, PP y PET y las de PE y PVC de Verdolotti et al. (2014) y Ruiz-Herrero et al. (2016), respectivamente, se proponen para la concepción de morteros ligeros con bajas capacidades mecánicas y alto nivel de aislamiento térmico.

Por su parte, Aattache et al. (2017) concluyen de los resultados obtenidos de la incorporación de polímero de PE a morteros de cemento que los nuevos compuestos presentan amplias posibilidades para la reparación de hormigones en medios agresivos.

También es necesario hablar de los nuevos compuestos basados en morteros de cemento y HDPE, los cuales presentan gran capacidad de aislamiento acústico, según los valores de velocidad de ultrasonidos.

Por último, cabe mencionar que las aplicaciones de los compuestos de morteros de cemento y espuma de PUR presentan limitaciones para su uso estructural, pero pueden ser eficaces en el desarrollo de revestimientos y juntas, como material resistente a la absorción de impactos.

7.3. YESO CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

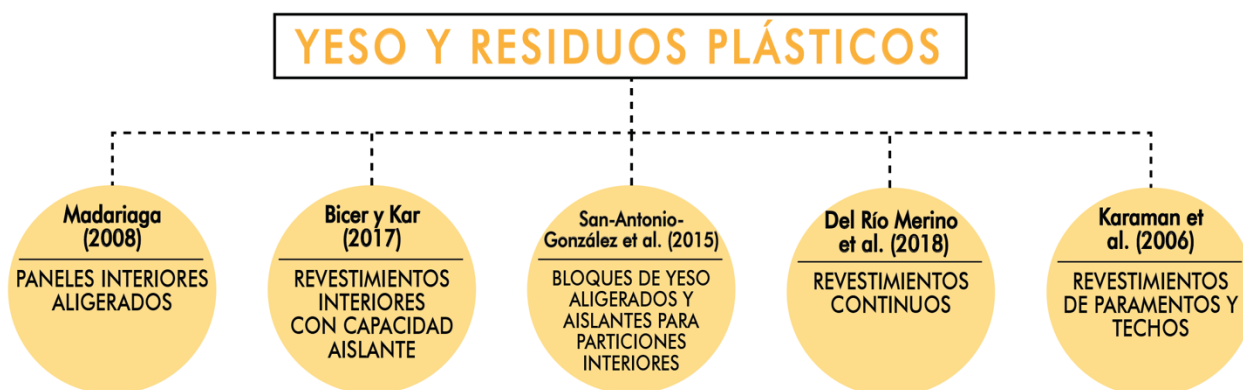


Fig. 35. APLICACIONES DE LOS MATERIALES DESARROLLADOS DE YESO Y RESIDUOS PLÁSTICOS, SEGÚN LO EXTRAÍDO DE LOS ARTÍCULOS DE REFERENCIA

En la Fig. 35 se muestran las posibles aplicaciones propuestas por los distintos autores, tras el análisis de los resultados obtenidos.

Según Madariaga (2008), los compuestos de yeso y EPS podrían ser empleados en el desarrollo de paneles de yeso laminado más ligeras que las tradicionales. Sin embargo, su uso se limita a mero revestimiento, por lo que para dotarlas de cierta resistencia, se hace necesario su instalación combinada con paneles de yeso laminado estándar.

Por su parte, los resultados las muestras de yeso con EPS y resina de Tragacanto de Bicer y Kar (2017) informan que a partir de estos compuestos pueden generarse materiales de revestimientos y paneles aislantes de yeso. Además, su incorporación a edificios como materiales livianos contribuye en la disminución de los daños frente a posibles acciones sísmicas.

Además, las posibles aplicaciones muestras de yeso y XPS estudiadas por San-Antonio-González et al. (2015) se basan en el desarrollo de bloques de yeso para la construcción de particiones.

Por otro lado, cabe citar que los usos de las muestras de yeso con XPS de Del Río Merino et al. (2018) así como los de los compuestos de yeso y botellas de PET se limitan a revestimientos continuos de paramentos y techos.

8. CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica abordada sobre el reciclaje de residuos plásticos mediante su adición a hormigones, morteros de cemento y yesos arroja las siguientes conclusiones:

- Actualmente, la vida cotidiana en nuestro planeta necesita de la producción y uso masivos de plástico. Su alta durabilidad y resistencia, su gran capacidad aislante, junto a su reducida densidad y coste lo justifican (PlasticsEuropes, 2017).
- Sin embargo, como expone el informe de PlasticsEuropes (2017), la filosofía de “usar y tirar” con la que comúnmente son tratados estos productos es opuesta al tiempo que realmente tarda el residuo plástico en desaparecer.
- El inadecuado empleo del plástico está provocando la aparición de nuevos paisajes: la litosfera e hidrosfera de nuestro planeta poco a poco están siendo conquistadas por grandes masas de residuos en las que el plástico es el principal componente, alterando con ello numerosos ecosistemas (Ecologistas en Acción, 2017).
- Sin embargo, la componente paisajística no es la única afectada por la abundante presencia de plástico. Este residuo tiene cada vez un mayor impacto sobre la cadena alimenticia. Numerosas especies ingieren microplásticos y nanoplásticos existentes en dichos residuos, introduciendo sustancias tóxicas y cancerígenas en su organismo y afectando con ello al resto de especies implicadas en la cadena alimentaria (Ecologistas en Acción, 2015).
- Los nuevos paisajes y alimentos contaminados por la presencia “sintética” provocan una mayor aparición de enfermedades, tanto en plantas, animales como personas (Ecologistas en Acción, 2015).
- Ante tales circunstancias, organismos internacionales, estatales, autonómicos y municipales apuestan por el desarrollo de estrategias que promuevan en la sociedad un espíritu basado en el reciclaje de plástico (Ecologistas en Acción, 2017; Consejo Europeo, 2006; Consejo de los Consumidores y Usuarios de Andalucía, 2008).
- Concretamente, el carácter permanente que ofrece la Arquitectura plantea la posibilidad de dar una vida útil más longeva a los residuos plásticos. De ahí que numerosos autores estudien la incorporación de estos a materiales que marcan el lenguaje de la Arquitectura actual, como el hormigón, el mortero de cemento y el yeso, desarrollando nuevos productos que aúnen los beneficios de ambos componentes (material base y residuo plástico) y potencien la filosofía del reciclaje en la Arquitectura contemporánea. Los artículos analizados en el presente trabajo son una clara muestra de ello.
- La incorporación de residuo plástico a hormigones, morteros de cemento y yesos provoca una pérdida de cohesión en los nuevos materiales, lo que origina una mayor acumulación de agua libre. La evaporación de este agua provoca un aumento de la porosidad de los compuestos, influyendo directamente en las propiedades resultantes (Albano et al., 2009):
 - o El incremento de la porosidad de los nuevos materiales supone un incremento de la capacidad de absorción de agua de estos compuestos (Hannawi et al., 2010; Ruiz-herrero et al., 2016).

- Por otro lado, el aumento del contenido de residuo plástico provoca un descenso de la densidad de los nuevos materiales potenciado, además, por el hecho de que el residuo incorporado presenta menor densidad que el componente base, como confirman autores como Saika y De Brito (2014), Ruiz-Herrero et al. (2016), Ferrándiz-Mas et al. (2012) y Del Río Merino et al. (2018). El incremento de la porosidad del material y la bajada de densidad originan una disminución de la conductividad térmica. El aumento de la presencia de aire en la estructura molecular supone un aumento en la capacidad aislante de los nuevos productos. Los estudios de autores como Bicer y Kar (2017), Karaman et al. (2016), Badache et al. (2018), Wang y Meyer (2012), Kou et al. (2009) y Saikia y de Brito (2014) lo corroboran.
- Referido a las propiedades mecánicas de los nuevos materiales, en la mayoría de los casos, éstas resultan limitadas debido a la débil unión y a la falta de cohesión molecular entre la matriz y el componente plástico. Sin embargo, los estudios centrados en el desarrollo de nuevos materiales a partir de la incorporación de fibras de residuos plásticos ofrecen unos resultados más positivos, puesto que intervienen en la mejora de las características mecánicas de los nuevos compuestos, sobre todo en la resistencia a flexión de los mismos (Ghernouti et al., 2015).
- Los resultados de las investigaciones analizadas confirman las limitaciones resistentes de los nuevos materiales con agregados plásticos (Yang et al., 2015; Gadea et al, 2010), así como el prometedor futuro de los hormigones, morteros de cemento y yesos con incorporación de fibras plásticas (Ghernouti et al., 2015; Song et al., 2005). Su estudio y desarrollo podría dar lugar a la creación de materiales más ligeros y más resistentes.
- Los nuevos materiales con contenido de residuo plástico en forma de agregado pueden ser ampliamente empleados en la conformación de revestimientos de paramentos y techos con altas capacidades aislantes, en la creación de pavimentos y carreteras, gracias al incremento de la resistencia a la abrasión, así como en la ejecución de pavimentos que precisan drenaje, por el elevado nivel de absorción de agua que presentan (Da Silva et al, 2014; Verdolotti et al. (2014); Badache et al. (2018); Madariaga (2008); Bicer y Kar (2017); Bulut y Şahin, 2017; Albano et al., 2009).
- Por otro lado, la baja resistencia al vapor de agua de las muestras estudiadas permite confirmar las posibilidades de las mismas para el desarrollo de materiales de deshumidificación, según exponen Lucolano et al. (2013).
- Finalmente, cabe destacar que la ligereza de los compuestos desarrollados permite minimizar los daños que un posible sismo podría causar, convirtiéndose en materiales especialmente útiles para su aplicación en edificios sometidos a grandes esfuerzos dinámicos (Hannawi et al., 2010; Gadea et al., 2010).
- Con todo ello es posible concluir que el desarrollo de nuevos materiales compuestos resulta un campo satisfactorio en aras de conseguir potenciar la filosofía del reciclaje y la reutilización de los plásticos con el fin de alargar su vida útil. Asimismo se apuesta por la construcción de una Arquitectura Sostenible que responde activamente a la problemática de su presente y sana el mundo, la ciudad y la persona.

9. REFERENCIAS

- Aattache, A., Soltani, R., & Mahi, A. (2017). Investigations for properties improvement of recycled PE . polymer particles-reinforced mortars for repair practice. *Construction and Building Materials*, 146, 603-614.
- ABNT, Brazilian Association of Technical Standards (1991). NBR 12142: Concrete – Determination of traction strength in flexion – Method of test. Rio de Janeiro, p. 4.
- ABNT, Brazilian Association of Technical (1994). NBR 7222: Mortar and concrete – Determination of the tension strength of cylindrical specimens submitted to diametrical compression – Method of test. Rio de Janeiro, p. 3.
- ABNT, Brazilian Association of Technical (2007). NBR 5739: Concrete – Compression test of cylindric specimens - method of test. Rio de Janeiro, p. 9.
- AEMA, Agencia Europea de Medio Ambiente. Artículo: Basura en nuestros mares. <http://ecospip.org/1diSniu>
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29(10), 2707-2716.
- Alfahdawi, I. H., Osman, S. A., Hamid, R., & Al-Hadithi, A. I. (2016). Utilizing waste plastic polypropylene and polyethylene terephthalate as alternative aggregates to produce lightweight concrete: a review. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11(8), 1165-1173.
- Al-Tulaian, B. S., Al-Shannag, M. J., & Al-Hozaimy, A. R. (2016). Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 127, 102-110.
- American Society for Testing and Materials. Committee C-1 on Cement. (2013). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C109-80 (1983). Standard Tests Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C267 (1996). Chemical resistance of mortars, grouts and monolithic surfacings and polymer concretes
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C39/C39M-09 (2009). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 7 pp.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C39 (2015). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C496-71 (1996). Standard Tests Method for splitting tensile strenght of cylindrical concrete specimens.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C642 (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, doi:10.1520/C0642-06, www.astm.org

- ASTM, American Society for Testing and Materials, C. 642-06.(2006). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C 78 (2004). Standard test method for flexural strength of concrete. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, C78/C-78M (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third - Point Loading), American Society for Testing and Materials, USA, 4 pp.
- Badache, A., Benosman, A. S., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2018). Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials*, 163, 40-52.
- Bicer, A., & Kar, F. (2017). Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth. *Thermal Science and Engineering Progress*, 1, 59-65.
- Bulut, H. A., & Şahin, R. (2017). A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. *Composite Structures*, 178, 50-62.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829-2835.
- Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., & Di Maio, L. (2016). Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Engineering*, 99, 75-83.
- Consejo de los Consumidores y Usuarios de Andalucía. (2008). Informe sobre reciclaje.
- Consejo Europeo (2006). Directiva 2006/12/CE de 5 de abril de 2006, relativa a los residuos. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 27(2006), 114.
- Da Silva, A. M., de Brito, J., & Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, 71, 226-236.
- Del Río Merino, M., Astorqui, J. S. C., Sáez, P. V., Jiménez, R. S., & Cortina, M. G. (2018). Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. *Construction and Building Materials*, 158, 649-656.
- Ecologistas en Acción. (2015). Desengancharse del plástico. Problemas de un material ubicuo
- Ecologistas en Acción. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global. España: Ecologistas en Acción.
- EFNARC (2005). The European guidelines for self-compacting concrete specification, production and use. EFNARC.
- EN 1015-3. (1999). Methods of test for mortar for masonry. Part 3. Determination of consistence of fresh mortar.
- EN 1015-6 (1999). Methods of test for mortar for masonry. Part 6. Determination of bulk density of fresh mortar.

- EN 1015-10 (1999). Methods of test for mortar for masonry – Part 10. Determination of dry bulk density of hardened mortar.
- EN 1015-11 (1999). European Standard. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 12667 (2001). Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance.
- EN 196-1. (1996). Métodos de ensayo de cementos: determinación de las resistencias mecánicas.
- EN 480-1. (2011). Admixtures for concrete, mortar and grout – test methods – part 1: reference concrete and reference mortar for testing
- Ferrándiz Mas & Alcocel, E. M. G. (2012). Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). *Materiales de construcción*, (308), 547-566.
- Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., & Cheeseman, C. R. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285-292.
- Francis, D. C. (2005). *Diccionario visual de arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 672-677.
- German Institute for Standardisation (2008). DIN 51046: Testing of Ceramic materials; Determination of the Thermal Conductivity up to 1600 Deg.
- Geymayr, G. (1985). *Todo lo Esencial del Concreto en su Bolsillo: Elaboración, Protección, Reparación*, second ed. Valencia, Venezuela.
- Ghernouti, Y., & Rabehi, B. (2012). Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 145-153.
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H., & Makhoulfi, A. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Construction and Building Materials*, 82, 89-100.
- Gobierno Europeo (2009). *Plan Nacional Integrado de Residuos para el Período 2008-2015*. España: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42.
- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653-658.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste management*, 30(11), 2312-2320.

- Islam, M. J., Meherier, M. S., & Islam, A. R. (2016). Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 946-951.
- Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., & Cioffi, R. (2013). Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials & Design* (1980-2015), 52, 916-922.
- Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H., & Orung, I. (2006). Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, 6, 1119-1122.
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., & Lai, W. L. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 29(2), 621-628.
- Lima, P. R. L., Leite, M. B., & Santiago, E. Q. R. (2010). Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste management*, 30(6), 1107-1113.
- Madariaga, F. J. G. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes de la Construcción*, 60(509), 35-43.
- Mindess S, Young JF, Darwin D. (2003). *Concrete*. second ed. Upper Saddle River NJ: Prentice-Hall.
- Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P., & Turcry, P. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites*, 30(9), 806-814.
- Parres, F., Crespo-Amorós, J. E., & Nadal-Gisbert, A. (2009). Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3182-3188.
- PlasticsEurope. (2017). *Plastics – The Facts 2017*. PlasticsEurope, Belgium.
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., Velazco, G.J., (2004). *Manual del Concreto Estructural*, SIDETUR. Caracas, Venezuela.
- RILEM 49TFR, 1984. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites.
- Ruiz-Herrero, J. L., Nieto, D. V., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., ... & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2016). Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 104, 298-310.
- Saikia, N., & de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401.
- Saikia, N., & de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and building materials*, 52, 236-244.
- Salih SA, AL-Azaawee ME. (2014). Effect of polypropylene fibers on properties of mortar containing crushed bricks as aggregate. *Eng Technol* 2008;26:1508–23. Bouziani T, Benmounah A, Makhloufi Z, Bédérina M, Queneudec T'kint M. Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers. *J Adhes Sci Technol*;28:1823–34.

- San-Antonio-González, A., Merino, M. D. R., Arrebola, C. V., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and eps waste with enhanced mechanical strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015101.
- San-Antonio-Gonzalez, A., Merino, M. D. R., Arrebola, C. V., & Villoria-Saez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63.
- Sayadi, A. A., Tapia, J. V., Neitzert, T. R., & Clifton, G. C. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and building materials*, 112, 716-724.
- Serna, Á., del Rio, M., Palomo, J. G., & González, M. (2012). Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, 35, 633-641.
- Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste management*, 28(10), 1835-1852.
- Song P, Hwang S, Sheu B. (2005). Strength properties of nylon-and polypropylene- fiber-reinforced concretes. *Cement Concr Res* 2005;35:1546–50.
- TS 802. (2009). Design of concrete mixes. Turkish Codes.
- UNE EN 1015-11. (2007). Methods of test for mortar for masonry – determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Standards.
- UNE 102042 (2014). Gypsum plasters. Other test methods, S. A. f. S. a. Certification.
- UNE-EN ISO 11925-2:2002 (2002). Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Inflamabilidad de los productos de construcción cuando se someten a la acción directa de la llama. Parte 2: Ensayo con una fuente de llama única. (ISO 11925-2:2002).
- UNE-EN 12390-3:2003 (2003). Testing hardened concrete – Part 3: compressive strength of test specimens.
- UNE-EN 12390-5:2009 (2009). Testing hardened concrete – Part 5: flexural strength of test specimens.
- UNE-EN 12390-6:2010 (2010). Testing hardened concrete – Part 6: tensile splitting strength of test specimens.
- UNE EN 12390-7 (2009). Testing hardened concrete – Part 7: density of hardened concrete.
- UNE-EN 13279-1:2009 (2009) gypsum binders and gypsum plasters. Part 1: Definitions and requirements. Madrid: AENOR.
- UNE-EN 13279-2 (2006). Gypsum binders and gypsum plasters. Part 2: Test methods, S. A. f. S. a. Certification.
- UNE-EN 196-1:2005 (2005). “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de las resistencias mecánicas”.

UNE 83301 Test of concrete, Making and curing of specimens.

UNE 83821 Mortars, Test methods, Hardened mortars, Determination of flexural and compressive strength.

Verdolotti, L., Iucolano, F., Capasso, I., Lavorgna, M., Iannace, S., & Liguori, B. (2014). Recycling and recovery of PE-PP-PET-based fiber polymeric wastes as aggregate replacement in lightweight mortar: Evaluation of environmental friendly application. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(4), 1445-1451.

Wang, R., & Meyer, C. (2012). Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 975-981.

Yildirim, S. T., & Duygun, N. P. (2017, October). Mechanical and Physical Performance of Concrete Including Waste Electrical Cable Rubber. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 2, p. 022054). IOP Publishing.

Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: a review. *Construction and Building Materials*, 93, 180-188.

Záleská, M., Pavlíková, M., & Pavlík, Z. (2016, July). Properties of lightweight cement-based composites containing waste polypropylene. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1752, No. 1, p. 040030). AIP Publishing.

Zhang, Y. C., Dai, S. B., Huang, J., Duan, S. G., & Zhi, Z. Z. (2016). Preparation of Thermal Insulation Plaster with FGD Gypsum. *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske*, 65(5-6), 283-288.